

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Periodical Part, Published Version

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)

Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2011

BAWForschungskompodium

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101763>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

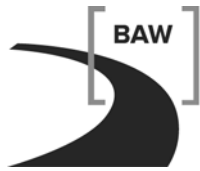
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2011): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2011. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWForschungskompodium).

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.

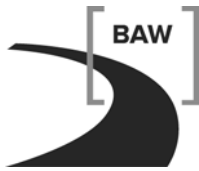




Bundesanstalt für Wasserbau
Kompetenz für die Wasserstraßen



Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2011



Vorwort

Mit 85 Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, die im Jahr 2011 bearbeitet wurden, hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ihre Forschungsaktivitäten im Vergleich zu den Vorjahren nochmals deutlich ausgeweitet. Dies ist in erster Linie auf das spürbar angehobene Forschungsbudget der BAW für den Zeitraum von 2011 bis 2014 zurückzuführen. Erstmals ist es möglich, dieses Budget anteilig für befristete Personaleinstellungen einzusetzen. Die in der Regel jungen Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler arbeiten entweder direkt bei der BAW oder in Kooperationsbeziehungen der BAW zu Universitäten im In- und Ausland. Sie unterstützen und ergänzen die Forschungsarbeiten, die vom Stammpersonal der BAW seit vielen Jahren erfolgreich geleistet werden.

Im Jahr 2011 standen Sachmittel für Vergaben von Aufträgen an Universitäten, Fachinstitute und Ingenieurbüros von ca. 900 T€ zur Verfügung. Das Budget für die Einstellung von befristeten Personal betrug ca. 750 T€.

Die verkehrswasserbauliche Forschung der BAW wird auf den Gebieten der Bautechnik, der Geotechnik sowie des Wasserbaus im Binnen- und Küstenbereich 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. Die mittelfristige Ausrichtung der verkehrswasserbaulichen Forschung der BAW ist im „Forschungsprogramm Verkehrswasserbau der Bundesanstalt für Wasserbau“ (siehe auch www.baw.de) dargestellt.

Im Jahr 2008 hat der Wissenschaftsrat die wissenschaftlichen Leistungen der BAW umfassend evaluiert. Die Forschungsleistungen der BAW wurden bereits zu diesem Zeitpunkt als überwiegend hochwertig bezeichnet, die technische Ausstattung wurde besonders positiv hervorgehoben. Gleichzeitig forderte der Wissenschaftsrat die BAW zu verstärkten Anstrengungen auf, um das bisherige hohe Niveau in Zukunft halten und die Forschungs- und Entwicklungsleistungen gezielt weiterentwickeln und ausbauen zu können. Die Empfehlungen des Wissenschaftsrats hat die BAW zwischenzeitlich weitestgehend umgesetzt. Wichtige Voraussetzungen wurden geschaffen, damit die BAW angesichts der komplexen fachlichen Aufgaben und des raschen wissenschaftlichen Erkenntnisfortschritts die Aufgaben der WSV und des BMVBS an den Wasserstraßen auch in Zukunft zuverlässig und vorausschauend unterstützen kann. Einer künftigen Evaluierung kann die BAW daher gelassen entgegen sehen.

Das vorliegende Forschungskompodium 2011 gibt einen vollständigen Überblick über die im Berichtszeitraum abgeschlossenen, laufenden und neu begonnenen Forschungsvorhaben der BAW, dargestellt in Form von Kurzberichten.

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

Dipl.-Ing. Claus Kunz
Forschungskordinator der BAW

Inhaltsverzeichnis

I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2011

| Bezeichnung | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich ¹⁾ | Seite |
|--|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| Rissbreitenbegrenzende Bewehrung für massige Betonbauteile | A39510110124 | B | S | 2 |
| Ermüdungsfestigkeitsversuche an geschmiedeten Hängeranschlüssen von Stabbogenbrücken | A39510110194 | B | S | 5 |
| Bewertung der Korrosion von Spundwänden | A39510210108 | B | N | 8 |
| Chlorideindringwiderstand von Beton | A39510310231 | B | N | 12 |
| Windstaudstudien und Entwicklung eines Operationellen Tideelbe-Modells (OPTEL) Teilprojekt OPTEL-C | A39550370134 | K | I | 14 |

II. Laufende FuE-Vorhaben in 2011

| Bezeichnung | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich ¹⁾ | Seite |
|---|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| Entwicklung eines Erhaltungsmanagementsystems für die WSV (EMS-WSV) auf der Basis der Ergebnisse der Bauwerksprüfung | A39510110139 | B | S | 18 |
| Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf | A39510110178 | B | S | 21 |
| Ermüdungssicherheit vollverschlossener Spiralseile | A39510170001 | B | S | 24 |
| Empfehlungen zum Pollerzug (Trossenzugansatz) für Binnenschiffsschleusen | A39510210106 | B | S | 27 |
| Korrosionsschutz mit Blatt 87 - Untersuchungen zu Zwischenhaftungs- und Farbproblemen | A39510210309 | B | I | 31 |
| Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Schleusentoren aus Faserverbundwerkstoffen | A39510270001 | B | I | 35 |
| Korrosionsschutz von Stahl in Beton - Untersuchungen zum Kathodenschutz der Straßenbrücke B500 über den Rhein bei Iffezheim | A39510270002 | B | I | 38 |
| Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe | A39510308099 | B | N | 42 |
| Instandsetzungssysteme für alte Wasserbauwerke | A39510310127 | B | N | 45 |

| Bezeichnung | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich^η | Seite |
|--|-----------------------|------------------|--------------------------------------|--------------|
| Einfluss von Schalung und Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter Betonoberflächen | A39510310141 | B | N | 48 |
| Adiabatische Wärmemessungen an ausgewählten Betonrezepturen | A39510310177 | B | N | 52 |
| Injektion von Hohlräumen hinter einer Vorsatzschale | A39510310234 | B | I | 53 |
| Textilbewehrte Vorsatzschalen zur Instandsetzung von Betonbauteilen | A39510310238 | B | I | 55 |
| Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken | A39510310240 | B | N | 59 |
| Überarbeitung des Turbulenzprüfverfahrens für Geokunststoffe | A39510370001 | B | N | 63 |
| Betone für massige Bauteile von Wasserbauwerken | A39510370003 | B | I | 65 |
| Messverfahren Hydratationswärme | A39510370004 | B | N | 67 |
| Verwendung von Acylatgelen und gelartigen Produkten für Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbauwerken im Verkehrswasserbau | A39510370005 | B | I | 69 |
| Ertüchtigung der Bewegungsfugen von Massivbauwerken im Verkehrswasserbau | A39510370006 | B | N | 72 |
| Mauerwerk im konstruktiven Wasserbau | A39510370007 | B | I | 74 |
| Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung | A39510370008 | B | N | 76 |
| Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen | A39510370009 | B | N | 79 |
| Parameter für Stoffgesetze bei FE-Berechnungen | A39520205613 | G | I | 82 |
| Bruch- und Verformungsverhalten von rutschgefährdeten Böschungen unter Berücksichtigung des Dreiphasensystems | A39520210001 | G | S | 85 |
| Böden unter Stoßbelastung | A39520210014 | G | S | 88 |
| Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken | A39520210045 | G | N | 91 |
| Numerische Modellierung von Bruchvorgängen in Böden | A39520210084 | G | I | 94 |
| Wechselbelastungen an Kleinverpresspfählen | A39520270001 | G | S | 97 |
| Bewertung dynamischer Pfahlprüfungen von Bohrpfählen | A39520270002 | G | S | 101 |

| Bezeichnung | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich ^{η)} | Seite |
|---|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| Hydraulischer Grundbruch in bindigem Boden | A39520305730 | G | S | 103 |
| Hydraulischer Grundbruch bei unterströmten Bauwerken mit luftseitigen Auflastfilter | A39520370001 | G | S | 106 |
| Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser | A39520370002 | G | N | 109 |
| Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke in den Wasserstraßen der WSV | A39520410006 | G | N | 112 |
| Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung | A39520410076 | G | N | 115 |
| Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen – Quantifizierung ihrer Belastbarkeit und Möglichkeiten ihrer Anwendung an Binnenwasserstraßen | A39520410151 | G | N | 117 |
| Ausbildung von Dichtungsanschlüssen im Streckenbereich von Wasserstraßen | A39520410217 | G | S | 121 |
| Setzungen von Sanden bei Schwingungsanregung | A39520570001 | G | S | 125 |
| Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen | A39520570002 | G | S | 128 |
| Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen | A39530110036 | W | N | 131 |
| Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau | A39530110064 | W | I | 135 |
| KLIWAS-Projekt 4.03: Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes | A39530170001 | W | M | 139 |
| Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen - Passierbarkeit | A39530170002 | W | N | 143 |
| Hydraulische Wirkung von Stromregulungsbauwerken | A39530210077 | W | N | 146 |
| Adaptierung und Erweiterung von Casulli-Algorithmen für Parallelrechner mit Hardware-Beschleunigung und zur Anwendung von konservativen Advektionsverfahren | A39530270001 | W | I | 149 |
| Effizienz- und Genauigkeitssteigerung der Modellierung der Hydrodynamik der Flüsse mit einem kombinierten Multigrid- und Subgrid-Ansatz | A39530270002 | W | I | 153 |
| Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) | A39530310105 | W | M | 156 |

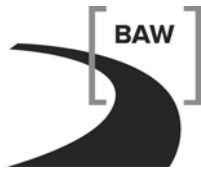
| Bezeichnung | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich^η | Seite |
|---|-----------------------|------------------|--------------------------------------|--------------|
| Bemessung und Konstruktion von Schlauchwehren | A39530370001 | W | I | 159 |
| Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen | A39530410035 | W | M | 162 |
| Wartezeiten vor Engstellen | A39530410036 | W | M | 165 |
| Mindestabstände Schiff-Sohle zur Vermeidung von Steinschlägen | A39530410037 | W | S | 167 |
| Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle | A39530410038 | W | N | 169 |
| Ermittlung notwendiger Fahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt | A39530470001 | W | M | 173 |
| Binnenschiffsführungssimulation | A39530470003 | W | M | 177 |
| Konsolidationsverhalten von Baggergut (Schlick) | A39550110100 | K | N | 180 |
| Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau | A39550110158 | K | N | 183 |
| Deckwerksanalyse mit der Distinkt Element Method (DEM) | A39550170270 | K | I | 186 |
| Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen | A39550170318 | K | S | 190 |
| Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiff-fahrtsstraße - Schiffsdynamik | A39550210055 | K | M | 193 |
| MudSim: Numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlick (MudSim-B) | A39550210093 | K | N | 196 |
| Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht - AufMod - | A39550270116 | K | I | 200 |
| Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiff-fahrtsstraße: Schiffsführungssimulation der Revierfahrt | A39550270132 | K | M | 204 |
| Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiff-fahrtsstraße: Schiffshydrodynamik im Flachwasser | A39550270133 | K | N | 207 |
| KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt | A39550310162 | K | M | 210 |
| UnTRIM SubGrid-Topografie | A39550370150 | K | I | 214 |
| KLIMZUG-Nord – Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg | A39550370163 | K | N | 217 |
| XtremRisk: Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten – Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel | A39550370165 | K | N | 220 |

| Bezeichnung | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich ¹⁾ | Seite |
|---|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph | A39550370178 | K | N | 224 |
| Interaktion von Sedimenttransport und Wasserqualität in dreidimensionalen Ästuarmodellen | A39550370190 | K | I | 227 |
| Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE | A39550670400 | K (KFKI) | I | 230 |

III. Neue FuE-Vorhaben in 2011

| Bezeichnung | Auftragsnummer | Abteilung | Forschungsbereich ¹⁾ | Seite |
|--|----------------|-----------|---------------------------------|-------|
| Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke (SiBeWa) | A39510070001 | B | S | 235 |
| Zwangsbeanspruchung bei dicken, gerissenen Stahlbetonquerschnitten | A39510170002 | B | N | 237 |
| Korrosionseigenschaften von Spundwandstählen | A39510270003 | B | N | 239 |
| Filterstabilität grober Gesteinskörnungen | A39520470001 | G | S | 241 |
| Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit | A39520470002 | G | N | 243 |
| Erosion von Dichtungstonen und bindigen Böden unter Strömungsbelastung | A39520470003 | G | S | 246 |
| Zustandsentwicklung von Deckwerken | A39520470004 | G | N | 248 |
| Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen | A39530170003 | W | N | 251 |
| Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen | A39550270141 | K | N | 254 |
| Schiffserzeugter Sedimenttransport (SeST) | A39550270142 | K | N | 258 |
| Weiterentwicklung der Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen | A39550370200 | K | I | 262 |

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



I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2011

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

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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.

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 Einfluss der Eigenspannungen auf den Rissprozess. Im Ablauf der Rissbildung ist von Interesse, welcher Anteil der Zwangskraft bei dicken Querschnitten von der konzentriert am Rand angeordneten Bewehrung aufzunehmen ist. Ebenso 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 Süfeld mit Messaufnehmern versehen (Temperatur, Dehnungen, Spannungen). Parallel werden die Bauabschnitte zur Zeit bei der Uni Leipzig mit 3D-FEM-Modellen nachgerechnet. Zwei Berichte über die Messungen in der Schleusenkammersohle und den Schleusenkamerwänden liegen vor.

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 von der Bewehrung aufgenommen werden muss. Für die anschließend auftretende Zwangsbeanspruchung wird angenommen, dass diese die Risschnittgröße nicht überschreitet. Die Risschnittgröße, die von der Bewehrung aufgenommen werden muss, wird zur Berücksichtigung der Eigenspannungen durch den Faktor k reduziert, der mit der Bauteildicke zunimmt, aber bereits ab einer Bauteildicke von 80 cm mit $k = \text{const.} = 0,5$ angesetzt wird. Ebenso wird die Risschnittgröße zu einem frühen Zeitpunkt bestimmt, zu dem die Zugfestigkeit nur zu 50% ausgebildet ist, was zu einer weiteren Reduktion der Risschnittgröße führt. Beide Faktoren sind rechnerisch nicht belegt und eher pragmatisch an Erfahrungswerten kalibriert. Es kann gezeigt werden, dass die Bemessung nach diesem Konzept im Einzelfall sowohl unsicher als auch unwirtschaftlich sein kann, letzteres insbesondere mit zunehmender Querschnittsdicke.

Ein mechanisch konsistentes Modell kann erreicht werden, wenn der Fokus auf die Verformungskompatibilität gelegt wird. Auf der einen Seite gibt es einen Verformungsbedarf des Bauteils, der durch den Hydratationsprozess initiiert wird und von den äußeren Randbedingungen verhindert wird. Auf der anderen Seite gibt es eine Verformungsmöglichkeit des Bauteils durch die Bildung von primären und sekundären Rissen. Wenn der Verformungsbedarf durch die Verformungsmöglichkeit aufgenommen werden kann und gleichzeitig die Rissbreiten auf das gewünschte Maß begrenzt sind, ist das Bauteil sicher und wirtschaftlich bewehrt.

Der Verformungsbedarf wird durch die behinderte Verformung beschrieben. Wird ein Bauteil gezwängt, entwickelt sich eine Zwangskraft im Bauteil, die die behinderte Verformung charakterisiert. Von Bedeutung ist dabei die Zwangskraft zum Ende des Hydratationsprozesses. Die Zwangskraft zum Risszeitpunkt ist ohne Bedeutung, da zu diesem Zeitpunkt nur die Zwangskraft vom Beton in die Bewehrung über geht. Die Zwangskraft bei Temperaturengleich ist von der ab dem zweiten Nullspannungszeitpunkt wirkenden Temperaturdifferenz abhängig und dabei nur von dem zentrischen Zwang erzeugenden Temperaturanteil. Wenn diese äquivalente Temperaturdifferenz aus der Zwangskraft berechnet wird, ist ein Maß für den Verformungsbedarf gegeben.

Auswertungen über verschiedene Betonrezepturen und Randbedingungen zeigen dabei, dass diese äquivalente Temperaturdifferenz aus der adiabatischen Temperaturentwicklung ermittelt werden kann. Sie ist deutlich kleiner als die adiabatische Temperaturerhöhung (maximal ca. 55%), da nur ein Teil der adiabatischen Temperaturerhöhung in zentrischen Zwang umgesetzt wird.

Die Verformungsmöglichkeit wird durch das erforderliche Rissbild beschrieben. Da der sich einstellende Rissabstand allein von den geometrischen Verhältnissen des zwängenden zum gezwängten Bauteil abhängig ist, kann für baupraktische Verhältnisse ein maximaler Rissabstand der Primärrisse vorgegeben werden. Damit kann zusammen mit der äquivalenten Temperaturdifferenz die im Falle der freien Verformung auftretende Verkürzung ermittelt werden. Die durch die vorgegebene Primärrissbreite (z. B. $w_k = 0,25$ 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.

Zuletzt muss sichergestellt werden, dass die zur Bildung der Sekundärrisse erforderliche Spannung in der Bewehrung im Primärriss dort die vorgegebene Rissbreite nicht überschreitet.

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes sind im Mitteilungsblatt Nr. 92 der Bundesanstalt für Wasserbau ausführlich beschrieben.

Das Verfahren wurde mittlerweile für die Praxis weiterentwickelt und für die Problematik Sohlplatte auf Boden ergänzt. Die Ergebnisse sind in ein überarbeitetes Merkblatt Früher Zwang der BAW eingeflossen, das im Januar 2012 vom BMVBS eingeführt wurde.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Forschungsprojekt wurde im Dezember 2011 abgeschlossen.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

Tue, N.V.; Bödefeld, J.; Dietz, J.: Einfluss der Eigenspannung auf die Rissbildung bei dicken Bauteilen im jungen Betonalter, Beton und Stahlbetonbau 102 (2007), Heft 4, S.215 – 222

Tue, N.V.; Schlicke, D.; Bödefeld, J.: Beanspruchungen in dicken Bodenplatten durch Abfließen der Hydratationswärme, Bautechnik 84 (2007), Heft 10, S.702 - 710

Bödefeld, J.: Rissmechanik in dicken Stahlbetonbauteilen bei abfließender Hydratationswärme, in: Mitteilungsblatt der Bundesanstalt für Wasserbau Nr. 92, April 2010

Bödefeld, J.; Ehmann, R.; Schlicke, D.; Tue, N.V.: Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten in Stahlbetonbauteilen infolge des Hydratationsprozesses – Teil 1, in: Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 1, S. 32 – 37

Bödefeld, J.; Ehmann, R.; Schlicke, D.; Tue, N.V.: Mindestbewehrung zur Begrenzung der Rissbreiten in Stahlbetonbauteilen infolge des Hydratationsprozesses – Teil 2, in: Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012), Heft 2

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 Standsicherheit der Brücke von besonderer Bedeutung ist, wurde von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ein Leitfaden zum DIN Fachbericht 103 mit erarbeitet, [Leitfaden, 2007]. 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 [Lehmann, E., 2000, Günter et al, 2000]. 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 (siehe Bild 1). Dies ist die Hünxer Brücke und Ahsener Brücke am Wesel-Dattel-Kanal und die Brücke Maximilian am Datteln-Hamm-Kanal. Neu gebaut wurde ebenfalls die Lindenhorster Brücke am Dortmund-Ems-Kanal, die mit geschmiedeten Hängeranschlüssen ausgebildet wurde. Bild 2 zeigt einen eingebauten, geschmiedeten Hänger an der Hünxer Brücke.



Bild 1: Geschmiedeter Hänger, Ahsener-Brücke

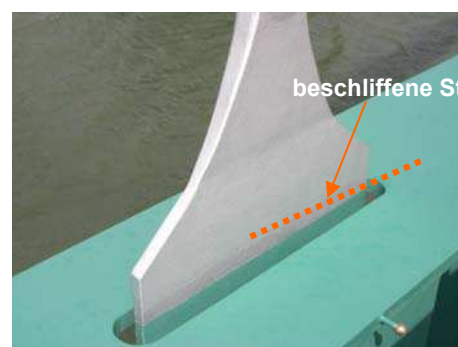


Bild 2: Geschmiedeter Hänger, Hünxer-Brücke

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 sollte durch Ermüdungsfestigkeitsversuche bestätigt werden. Nur durch Versuche ist eine quantitative Einschätzung der Ermüdungssicherheit gegeben. Ziel dieses Vorhabens war 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) sollte mit der Angabe von Kerbdetails ein Hilfsmittel zur wirtschaftlichen und ermüdungssicheren Ausführung von geschmiedeten Hängeranschlüssen zur Verfügung gestellt werden.

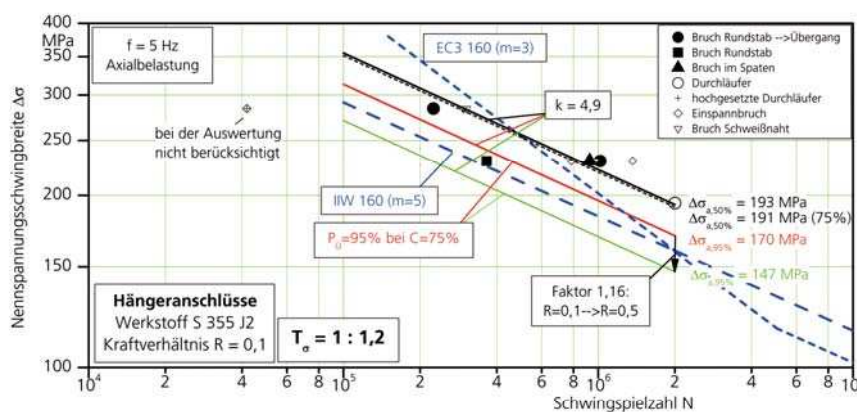
2 Untersuchungsmethoden

Die Kerbkategorie eines Kerbdetails wurde mit Dauerfestigkeitsversuchen an 10 Prüfkörpern gewonnen. Die Prüfkörper wurden im Maßstab 1:1 aus S 355 J2 nach vorgegebener Musterzeichnung und nach Schablone hergestellt. Die Gesamtlänge des Hängers wurde auf 1,2m beschränkt. Als Stabdurchmesser ist ein Durchmesser von 82mm gewählt worden. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften wurden an einer parallel hergestellten Probe überprüft, mit den mitgelieferten Zeugnissen verglichen und dokumentiert. Die Prüfungen sind mit einem Resonanzpulsar durchgeführt worden, um die Versuchsdauer zu verkürzen. Die Durchführung und Auswertung der Ermüdungsfestigkeitsversuche wurde durch ein externes Institut vorgenommen werden.

3 Ergebnisse

Nach einer Ausschreibung in 2010 wurde die Ermüdungsfestigkeitsversuche durch das Fraunhoferinstitut, Darmstadt durchgeführt. Als ertragbare Spannungsschwingbreite bei 2×10^6 Lastspielen konnte ein Wert von 147MPa ermittelt werden. Anhand der Versuchswerte konnte eine Wöhlerlinienneigung von $k=4,9$ bestimmt werden. Die Bundesanstalt für Wasserbau empfiehlt für Ermüdungsfestigkeitsnachweise geschmiedeter Hängeranschlüsse höchstens die Kerbgruppe 140 mit einer Wöhlerlinienneigung von $k=5$ anzunehmen. Dem Diagramm 1 können die Versuchsergebnisse und die daraus entwickelte Wöhlerlinie entnommen werden.

Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche



LBF 281204

© Fraunhofer LBF

Bild 3: Ergebnisse der Schwingfestigkeitsversuche

Materialuntersuchungen zeigen, dass die erforderlichen mechanischen Eigenschaften auch nach dem Schmiedevorgang und der anschließenden Wärmebehandlung erreicht werden. Die Streckgrenze und die Zugfestigkeit werden leicht reduziert, wobei die Bruchdehnung und die Kerbschlagarbeit im Vergleich zum Grundmaterial zunehmen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von geschmiedeten Hängeranschlüssen wurde mit dem Abschlussbericht des FuE Projektes vom 11.11.2011 abgeschlossen. Die wesentlichen Ergebnisse wurden in einem BAW-Brief publiziert.

5 Literatur

Leitfaden zum Anhang II-H (2007): Hänger von Stabbogenbrücken des DIN-Fachberichtes 103:2009-03, Bundesanstalt für Straßenwesen und Bundesanstalt für Wasserbau, Ausgabe Dezember 2007.

Lehmann, E. (2000): Bau von drei Bogenbrücken im Zuge der brandenburgischen Autobahnen. Sonderheft Brandenburgisches Autobahnamt 2000.

Günther, Hortmanns, Schwarzkopf, Sedlacek, Bohmann; (2000): Dauerhafte Ausführung von Hängeranschlüssen an stählernen Bogenbrücken. Heft 11, Stahlbau 69, 2000.

6 Veröffentlichungen

BAW-Brief Nr.1- Februar 2012: Deutscher, M., Gabrys, U.: Beitrag 609 – B, Ermüdungssicherheit von geschmiedeten Hängerstangenanschlüssen. BAW-Brief der Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2012.

Bewertung der Korrosion von Spundwänden

Netzplan-Nr.: A39510210108 (ehemals: 8159)

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 des 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) teilweise bestätigt (Bild 1). Die Verringerung der Abrostungsraten mit der Nutzungsdauer zeigt sich allerdings nach ca. 20 Jahren im Wesentlichen bereits als beendet. Dies bot die Möglichkeit, mit Spundwandbauwerken, die ein Alter von mind. 20 Jahren besitzen, die statistischen Beziehungen der Abrostungsraten mit Wo zu verfeinern. Die beste Annäherungen ergaben sich, wenn zu Wo noch der Faktor Sauerstoffsättigung hinzugefügt worden ist.

Demzufolge kann eine einfache Betrachtung der Spundwandabrostung erfolgen, wenn über den Wasserchemismus Wo berechnet wird. Damit kann die aufwändige Berechnung unter Einbeziehung aller zu erstellenden Daten (einschließlich Stahlzusammensetzung), mit Hilfe einer multifunktionalen Faktoranalyse Berechnung eine Zuordnung vorgenommen werden (s. ECSC-Vorhaben).

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* (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 "Rostschutzschichten" 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 Einschätzung in erster Näherung der zu erwartenden Korrosionsgefährdung von Spundwandbauwerken ermöglicht werden.

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 Betrachtung der Abrostungsdaten beigesteuert. Die Auswertungen und statistischen Betrachtungen im ECSC-Forschungsvorhaben zeigten die Relevanz der ausgewählten Parameter. Die so ermittelte Abrostungsformel ist allerdings nur sehr aufwändig anzuwenden. Geht man davon aus, dass bei den betrachteten Spundwänden Einflüsse durch MIC ausgeschlossen werden können, so zeigen diese Untersuchungen, dass die Abrostungen im direkten Zusammenhang mit dem Chemismus der Immersionsmedien stehen. Eine Verfeinerung gelingt, wenn man den Sauerstoffgehalt zum Wo-Wert hinzuzieht und zudem nur Bauwerke ausgewertet werden, die älter als 21 Jahre sind. Unter diesen Voraussetzungen lassen sich sogar Abrostungen über der gesamten Spannweite der vorliegenden Gewässertypen darstellen. Die aus der DIN 50929 stammenden Vorschläge zur Abrostung wurden hier nochmals überprüft, wobei für bestimmte Korrosionsarten (Loch- und Flächenkorrosion) und gewisse Zonen eine relativ gute Übereinstimmung der Korrosionsraten herausgearbeitet werden kann (Bild 1).

Abrostungsmessungen an Spundwänden von angeblich widerstandsfähigerem Cu-legiertem Stahl ergaben noch keine zweifelsfreien Hinweise auf verbesserten Korrosionsschutz durch diesen Stahltyp. Die Untersuchungen wurden durch Auswertung von existierenden Spundwandbauwerken, wie auch durch labormäßige Ermittlung der Abrostungsraten an Stahlproben durchgeführt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Projekt ist im Juni 2011 mit der Erstellung eines Abschlussberichts abgeschlossen worden.

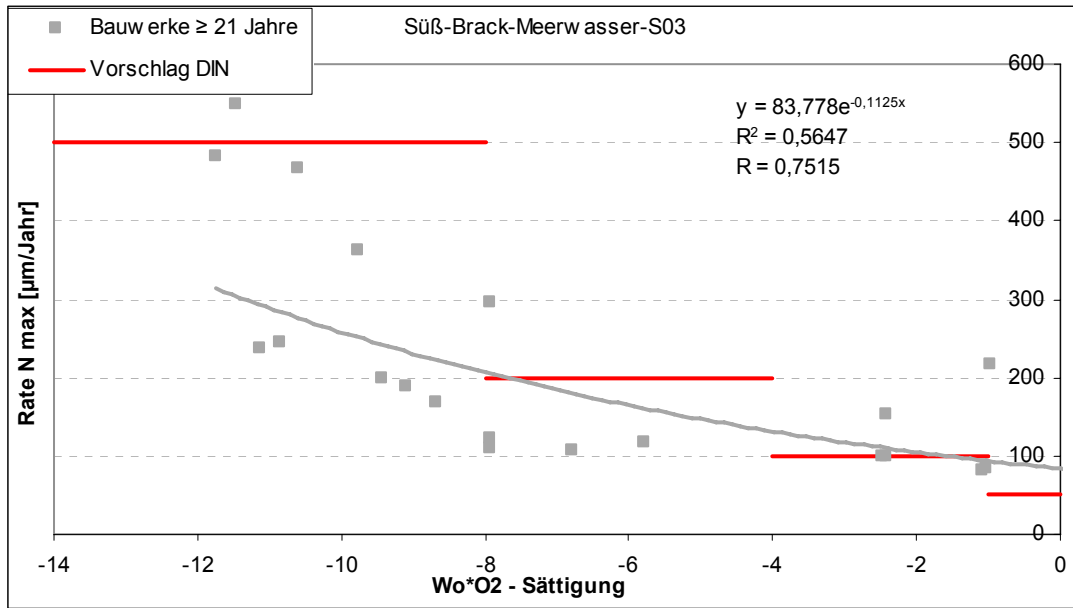


Bild 1: Abrostungsraten der DIN 50929 im Vergleich mit den Resultaten dieser Untersuchungen

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 [Gehlen, C.; Osterminski, K.; 2009].

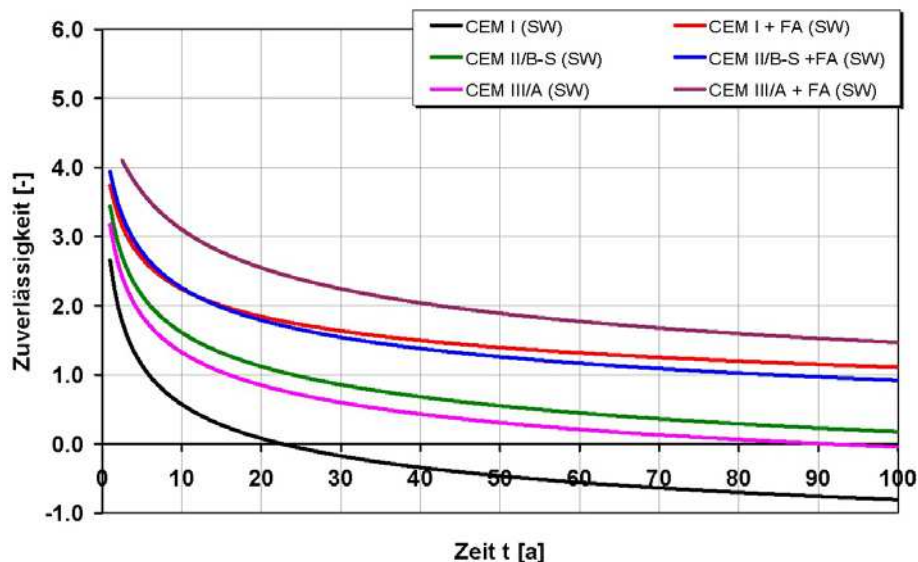


Bild 1: Ergebnisse der Modellierung der Zuverlässigkeit für Betone in der Wasserwechselzone

Die Berechnungen ergaben, dass die Bindemittelart den größten Einfluss besitzt. Während reiner Portlandzementbeton (CEM I) für die Expositionsklasse XS3 ungeeignet ist, können mit der Kombination von Hochofenzement und Flugasche (CEM III/A + FA) i.d.R. ausreichende Chlorideindringwiderstände erreicht werden. Durch eine Erhöhung der Betondeckung könnten mit solchen Bindemittel-Flugasche-Kombinationen Lebensdauern von 100 Jahren mit ausreichender Sicherheit ($\beta = 1,5$) realisiert werden.

Da die Erhöhung der Betondeckung jedoch grundsätzlich zu Nachteilen im Hinblick auf die Bildung von Rissen führen kann, wurde im Rahmen der Regelwerksanpassung vorerst auf diese Maßnahme verzichtet. Für den Bereich Neubau wurden im aktuellen Gelbdruck der Neufassung der ZTV-W LB 215 lediglich entsprechende Anpassungen der deskriptiven Anforderungen (Zementarten, Flugascheanteile) gemäß den vorgenannten Erkenntnissen vorgenommen.

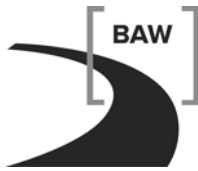
4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Bemessung des Chlorideindringwiderstands als ein wichtiger Baustein der Dauerhaftigkeitsbemessung wurde im Jahr 2011 in das FuE-Vorhaben „Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken“ überführt, da für dieses FuE-Vorhaben bis zum Jahr 2014 zusätzliche Personalressourcen bereit stehen. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens werden weitergehende Bemessungskonzepte erarbeitet.

Das Forschungsvorhaben „Chlorideindringwiderstand von Beton“ wurde mit der Überführung in das FuE-Vorhaben „Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken“ formal beendet. Ein Abschlußbericht wurde erstellt.

5 Literatur

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



Windstaudstudien und Entwicklung eines operationellen Tideelbe-Modells (OPTEL)

Teilprojekt OPTEL-C

Netzplan-Nr.: A39550370134

Projektleiter OPTEL: Dr. S. Müller – Navarra, BSH

Projektleiterin OPTEL-C: Dr. E. Rudolph, Dienststelle Hamburg, Referat Ästuarsysteme II (K3)

Projektmitarbeiterin BAW: Dr. C. Kremp, Dienststelle Hamburg, Referat Ästuarsysteme II (K3)

E-Mail: elisabeth.rudolph@baw.de, christine.kremp@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

Die Elbe und besonders die tidebeeinflusste Unterelbe ist ein stark frequentierter Schifffahrtsweg. Aufgrund des Tideeinflusses benötigen Schiffe, die von der Nordsee kommend die Elbe nach Hamburg befahren, präzise und möglichst langfristige Vorhersagen des Wasserstandes. Für Manöver im Hafen wie z. B. das Eindocken von Schiffen oder das Wenden sehr großer Schiffe werden zusätzlich detaillierte Kenntnisse der tideabhängigen Strömungsverhältnisse benötigt.

Bei extremen Ereignissen wie Sturmfluten, sehr hohen oder auch sehr niedrigen Oberwasserzuflüssen in die Tideelbe 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 ermöglichen.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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 außer-gewöhnlich niedrigen Wasserständen sind Wasserstands- und Strömungsentwicklung für die operationelle Vorhersage noch nicht ausreichend erforscht.

Bei Wasserstandsvorhersagen für die Elbe in Extremsituationen wie z.B. Sturmfluten werden zur Zeit auch empirische Verfahren eingesetzt. Die dabei verwendeten Ansätze werden auf der Grundlage langjähriger Erfahrung gewonnen. Bei Veränderungen in z.B. der Fahrrinne der Elbe müssen diese Verfahren mit neuen Beobachtungszeitreihen an die neuen Verhältnisse angepasst werden. Der Einsatz räumlich hochaufgelöster 3-dimensionaler hydrodynamisch numerischer (HN-) Modelle, [UnTRIM in BAW, 2004], [Casulli, V., Walters, R.A., 2000], bietet die Möglichkeit z. B. die Topographie jederzeit an die neuen Gegebenheiten anzupassen und somit prognosefähig zu bleiben. Zusätzlich erhält man als Ergebnis Informationen über die räumliche und zeitliche Strömungs- und Salzgehaltsverteilung im Vorhersagegebiet.

1.2 Bedeutung für die WSV

Verbesserte Vorhersagen von Wasserstands- und Strömungsverhältnissen ermöglichen zusätzlich zu einer verbesserten Beratung der Schifffahrt auch die Möglichkeit, bei Havarien im Bereich der Elbe die Öl- bzw. Schadstoffbekämpfung effizienter zu betreiben.

1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen des Projektes [OPTEL-C] wird eine operationelle Wasserstands-, Strömungs- und Salztransportvorhersage für die Tideelbe entwickelt, die auch bei extremen Wind- und/oder Abflusssituationen Vorhersagen zu Verfügung stellt. Bei der Konzeption des Vorhersagesystems aus Atmosphäre, Nordsee und Tideelbe wird beachtet, dass eine Übertragung auf die Ästuarie von Jade-Weser und Ems möglich ist.

2 Untersuchungsmethoden

Auf der Grundlage des 3-dimensionalen hydrodynamisch numerischen Modells [UnTRIM] wird das BAW-Vorhersagemodell-Elbe entwickelt. Das mathematische Verfahren UnTRIM eignet sich besonders für Anwendungen in geometrisch komplexen Ästuaren mit regelmäßigem Überfluten und Trockenfallen. Das BAW-Vorhersagemodell für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt in der Tideelbe erhält Informationen über den vorhergesagten Wind über der Elbe aus dem Wettervorhersagemodell [COSMO-EU des DWD]. Am seeseitigen Rand zur Nordsee werden Wasserstands- und Salztransportvorhersagen aus dem Vorhersagemodell [BSHcmod] des BSH vorgegeben. Als Abfluss für den Vorhersagezeitraum wird die letzte verfügbare Abflussmessung in Neu Darchau (BfG) verwendet. Die vom BAW-Vorhersagemodell-Elbe benötigten Schnittstellen zu den genannten Randwerten sind in [OPTEL-C] in enger Zusammenarbeit mit [OPTEL-A] und [OPTEL-B] entwickelt worden.

Zur Kalibrierung und Validierung des BAW-Vorhersagemodells-Elbe stehen Messungen von Wasserstand, Strömung und Salzgehalt entlang des Ästuares sowie Randwerte für 6 Szenarien aus den Jahren 2006, 2007 und 2008 zu Verfügung. Die Wasserstandsrandwerte stammen zum einen aus dem Vorhersagemodell des BSH und zum anderen aus Messungen. Die 6 von [OPTEL-D] ausgewählten Szenarien beinhalten unterschiedliche meteorologische und hydrologische Situationen, wie mittlere Verhältnisse, Sturmfluten, Sturmebbe oder sehr hohe bzw. sehr niedrige Oberwasserzuflüsse.

Das kalibrierte BAW-Vorhersagemodell-Elbe ist auf dem BSH-Rechner implementiert und liefert im operationellen Betrieb Wasserstands- und Strömungsvorhersagen für die Elbe.

3 Ergebnisse

Der Vergleich von Messung mit Vorhersage für die 6 Szenarien zeigt die Bedeutung der Randwerte für die Güte der Vorhersage entlang des Ästuares. Wird die Vorhersage der Szenarienzeiträume mit Messungen des Wasserstandes angetrieben, so werden die Tidehochwasser Thw entlang der Elbe auf ± 10 cm und die Tideniedrigwasser Tnw entlang der Elbe auf ± 40 cm vorhergesagt. Durch den Einsatz von Ergebnissen aus dem Vorhersagemodell des [BSH] zur Randwertgenerierung für die Szenarienzeiträume erreicht die Vorhersage $+ 10$ cm/ $- 25$ cm im Tidehochwasser Thw und $+ 30$ cm/ $- 60$ cm im Tideniedrigwasser Tnw, da die Vorhersagen für die Elbe zusätzlich von der Vorhersagegüte der Randwerte abhängen. Die Wasserstandsvorhersage für die Elbe verbessern sich besonders bei Sturmflut durch den Einsatz der von [OPTEL-B] bereitgestellten WAsP-Korrekturfaktoren im BAW-Vorhersagemodells-Elbe.

Das BAW-Vorhersagemodell-Elbe läuft seit dem 8. Januar 2011 ununterbrochen im präoperationellen Betrieb auf dem Rechner des BSH und erzeugt jeden Tag auf der Grundlage der Vorhersagen von BSH und DWD eine räumlich und zeitlich hochaufgelöste Vorhersage für Wasserstand, Strömung und Salzgehalt für die Tideelbe. Zur Randwertaufbereitung und Vorhersage der nächsten 24 Stunden benötigt das BAW-Vorhersagemodell-Elbe derzeit auf dem Rechner des BSH 3 Stunden.

Bild 1 (links) zeigt beispielhaft für die Elbmündung die Vorhersage des oberflächennahen Salzgehaltes für den 25. Oktober 2011 9:30 UTC (Thw bei Cuxhaven 10:00 UTC). Mit dem Flutstrom wird salzreiches Wasser besonders in der tiefen Fahrwinne stromauf transportiert. Bild 1 (rechts) zeigt für den gleichen Vorhersagezeitpunkt die oberflächennahe Strömungsgeschwindigkeit im Hamburger Hafen. Ca. eine Stunde nach Ebbestromkenterung in Hamburg St. Pauli erkennt man noch Ebbestromung im südlichen Bereich sowie den einsetzenden Flutstrom im nördlichen Hafenbereich.

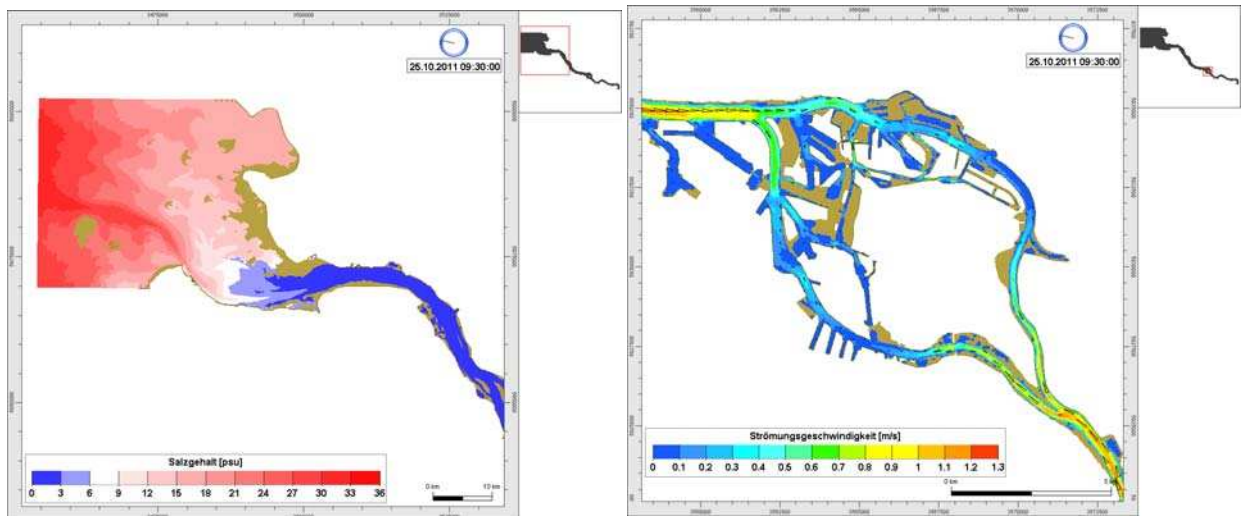


Bild 1: Salzgehaltsvorhersage (oberflächennah) für die Elbmündung (links) sowie Vorhersage der Strömungsgeschwindigkeit (oberflächennah) für den Hamburger Hafen (rechts) für den 25. Oktober 2011 9:30 UTC.

In einer sogenannten präoperationellen Phase führt das BAW-Vorhersagemodell-Elbe seit Anfang 2011 ununterbrochen in der Vorhersageumgebung täglich zwei 12 - stündige Wasserstands- und Strömungsvorhersagen durch. Nach der gemeinsamen Auswertung und Bewertung der Vorhersageergebnisse für die Elbe durch BSH und BAW wird gemeinsam über den Übergang des BAW-Vorhersagemodell-Elbe in den operationellen Betrieb entschieden werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

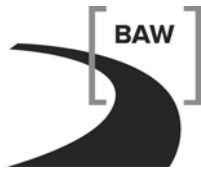
Das Forschungsvorhaben OPTEL – C konnte im geplanten Bearbeitungszeitraum erfolgreich durchgeführt werden. Das Vorhaben wurde im März 2011 abgeschlossen.

5 Literatur

- Casulli, V., 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.
- 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

6 Veröffentlichungen

- 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.
- Bork, I. und S. H. Müller-Navarra (2011): OPTEL-A Entwicklung eines operationellen Tideelbemodells auf der Basis des hydrodynamisch-numerischen Modellverfahrens BSHcmod für die Nord- und Ostsee. Abschlussbericht. BMBF 03KIS069/ KFKI 101. 75 Seiten.
- Ganske, A. und G. Rosenhagen (2010): OPTEL-B Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tideelbe. Abschlussbericht. BMBF 03KIS070/ KFKI 101. 33 Seiten
- Kremp, C. und E. Rudolph (2011): OPTEL-C Entwicklung eines operationellen Tidemodells der Elbe sowie einer Modellkopplung mit dem BSH-Vorhersagemodell der Nordsee. Abschlussbericht. BMBF 03KIS071/ KFKI 101. 137 Seiten.
- Strotmann, Th., C. Radegast und U. Ferk (2011): OPTEL-D Studien zur Stauentwicklung in der Tideelbe. Abschlussbericht. BMBF 03KIS072/ KFKI 101. 117 Seiten.



II. Laufende FuE-Vorhaben in 2011

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

Netzplan-Nr.: A39510110139

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 kaum komplette Verfahren [vgl. PIANC WG 129]. Nach Überprüfung und Anpassung können aber unterschiedliche Elemente der Management-Systeme übernommen werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die Altersstruktur der Verkehrswasserbauwerke in der WSV wird immer ungünstiger. Bei Schleusen sind 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 stufenweise. 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 On-line-Hilfe in WSVPruf integriert ist. Dieses wird seither jährlich um neue Kapitel erweitert. Mit der damit verbundenen Verbesserung und Homogenisierung der Schadenseinstufung bei der Bauwerksinspektion ist eine fundamentale Grundlage für ein Erhaltungsmanagementsystem erreicht.

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

Im 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. Die erforderlichen Parameter für die Funktionen wurden im Rahmen einer Expertenbefragung nach den Grundsätzen der Delphi-Methode ermittelt.

Aus den Antworten wurden sowohl die Parameter für die Überlebensfunktionen als auch die Koeffizienten der Markov-Matrizen für die Verfallsprozesse bestimmt. Beispielberechnungen mit realen WSVPruf-Daten (siehe Bild 1) zeigten die generelle Eignung des Verfahrens. In Diskussion mit der WSV wurde auch die Plausibilität der Ergebnisse bestätigt.

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

Nach der fachlichen Entwicklung der Zustandsprognose für die Bauwerke der WSV wurde dieses Verfahren it-technisch umgesetzt. Damit steht der BAW ein Zustandsprognosetool zur Verfügung, das –nach einer Testlaufzeit- für die WSV freigegeben werden kann.

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

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

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

Zur Erfassung von Instandsetzungsmaßnahmen und –kosten wird ein Fragebogen für die WSV vorgeschlagen, da IT-technisch keine verwertbaren Informationen darüber vorliegen. Die Abfrage erfolgt auf einer aggregierten Ebene, um eine Balance zwischen Aufwand und Nutzen zu erreichen.

Zur Berücksichtigung weiterer Parameter wurde ein transparentes Matrix-Verfahren entwickelt. Das Risiko, das von einem Bauwerk ausgeht, wird dabei wie allgemein üblich durch das Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und Schadensausmaß gebildet. Für die Eintrittswahrscheinlichkeit wird die Teilnote der Konstruktion bzw. des Stahlbaus verwendet, die direkt aus WSVPruf entnommen werden

kann. Das Schadensausmaß wird auf einer fünfstufigen Skala zwischen vernachlässigbar und katastrophal eingestuft. Zur Einstufung können beliebige Kriterien wie Verkehrsbedeutung der Wasserstraße, Umfahrungsmöglichkeiten, Umwelteinfluss, wirtschaftliche Folgen, etc. berücksichtigt werden, was das Verfahren sehr flexibel macht. Parallel wurden die entwickelten Module im Rahmen von WSV Anfragen eingesetzt.

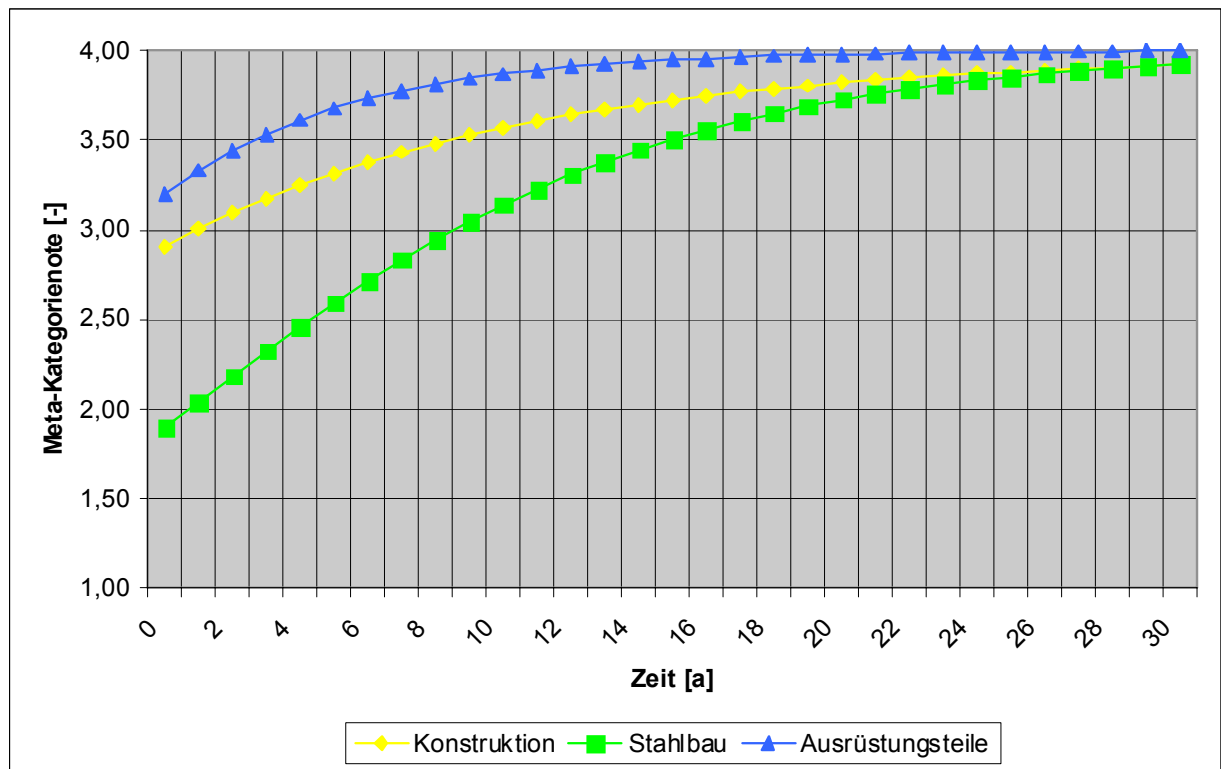


Bild 1: Prognose der drei Meta-Kategorienoten auf Basis der Inspektionsergebnisse

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012:

- Diskussion und Schärfung weiterer Faktoren für die Maßnahmenpriorisierung mit dem BMVBS
- Durchführung der Fragebogenaktion zur Erfassung der umgesetzten Instandsetzungsmaßnahmen und der zugehörigen Kosten

2013ff:

- Entwicklung von Strategien und Szenarien
- IT- Konzeption und Umsetzung

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

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

Kühni, K. (2010): A Maintenance System for Waterway Infrastructures. PIANC MMX, Tagungsband, Liverpool.

Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf

Netzplan-Nr.: A39510110178 (Nr. 8197)

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

E-Mail: holger.becker@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Notsituationen in der Schifffahrt können trotz Ankerwurfsverbots 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 Funktionstüchtigkeit des Bauwerkes einschränkt (z. B. Volllaufen eines Tunnels mit Wasser) und bei Kanälen ferner zum Leerlaufen einer ganzen Kanalstrecke führen kann.

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

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

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

Die Methoden bestehen aus in situ Messungen sowie theoretischen Ansätzen.

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

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

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

3 Ergebnisse

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

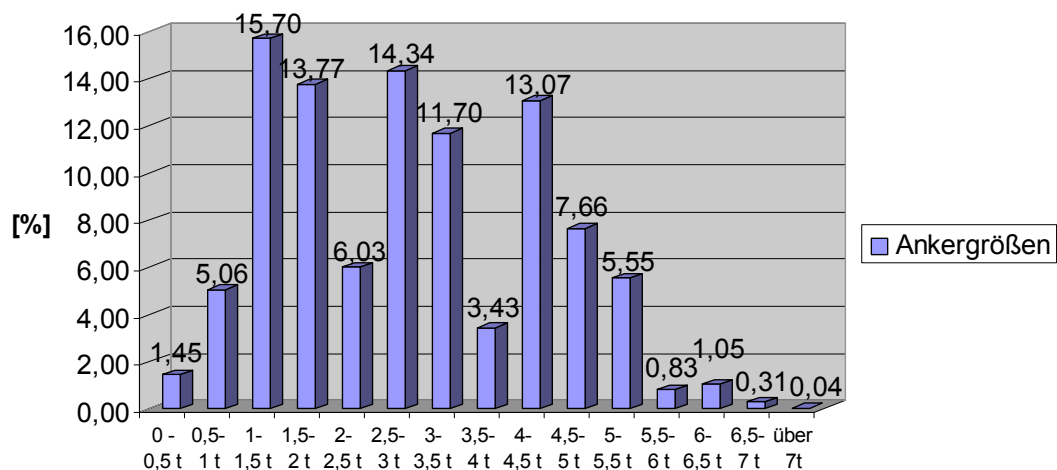


Bild 1: Verteilung der Ankergewichte auf dem NOK in den Jahren 2004 bis 2006 bei Auswertung von rund 45 % der Schiffspassagen

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

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

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

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

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

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Erfahrungen, welche aus der projektbezogenen Aufgabenstellung beim Straßentunnel Rendsburg gesammelt wurden, sollen nun für die Bemessung von unterirdischen Kreuzungsbauwerken im deutschen Binnenwasserstraßennetz verallgemeinert und in einen anwenderfreundlichen Bemessungsansatz für Ankerwurf einfließen. Hierzu wurden schon Konstruktionen und Querschnitte typischer Kreuzungsbauwerke analysiert, welche dann in Form von FE-Modellen rechnerisch untersucht werden sollen. Um einen Abgleich zwischen realer Eindringssituation und rechnerischen Randbedingungen der Modellierung zu erhalten laufen derzeit die Planungen zur messtechnischen Untersuchung des Eindringverhaltens und der Kräfteverteilung eines fallenden Ankers in einem entsprechenden Versuchsstand.

5 Literatur

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

Ermüdungssicherheit vollverschlossener Spiralseile**Netzplan-Nr.:** A39510170001**Projektleiter:** Dipl.-Ing. R. Ehmann, Dipl.-Ing. M. Schmidmeier, Abteilung Bautechnik, Referat Massivbau (B1)**E-Mail:** rainer.ehmann@baw.de, michael.schmidmeier@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

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

Untersucht werden sieben Seile mit verschiedenen Durchmessern von insgesamt zwei Seilherstellern. Die verwendeten Seilstärken decken dabei den erforderlichen Tragfähigkeitsbereich von Hängern in „üblichen“ Bogenbrücken ab (21 bis 45 mm Durchmesser). Die Versuchsseile besitzen jeweils eine

Länge von rund 5 m. Die Seile erfahren in den Versuchen eine kombinierte Wechselbelastung aus Normalkraft und Drehwinkel mit Norm gemäßen Lastspielzahlen.

Messtechnisch erfasst werden während der Versuche zum einen die Maschinenwerte der Versuchseinrichtung wie Zugkräfte im Seil, Wege und Kräfte zur Aufbringung der Seilkopfauslenkungen. Des Weiteren werden am Versuchsseil an einer Vielzahl von Stellen die Drahtspannungen über aufgeklebte Dehnmessstreifen gemessen. Mögliche Drahtbrüche des automatisiert ablaufenden Dauerschwingversuches werden über Schallsensoren aufgezeichnet.

3 Ergebnisse

Das Versuchskonzept wurde vom Ingenieurbüro Dr. Schütz Ingenieure aus Kempten aufgestellt, das die Untersuchungen auch fachwissenschaftlich betreut und auswertet. Die eigentlichen Bauteilversuche werden an der Materialprüfanstalt der Technischen Universität München durchgeführt. Die Versuche begannen im November 2010.



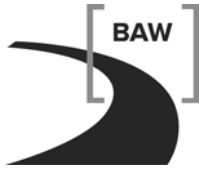
Bild 1: Versuchsstand an der MPA der TUM

Bis Ende 2011 konnten bereits vier der insgesamt acht vorgesehenen Versuche abgeschlossen werden. Unter verschiedenen Beanspruchungsniveaus und Beanspruchungsarten („statische“ und „dynamische“ Biegung, Biegung in Kombination mit veränderlicher Normalkraft, etc.) wurden dabei Erkenntnisse zum Trag- und Ermüdungsverhalten von vollverschlossenen Seilen unter Biegung gewonnen.

Bei zwei Seilen traten Drahtbrüche während der Ermüdungsversuche auf. Deren zeitliche Entwicklung konnte versuchsparallel aufgezeichnet werden. Die Zuordnung der Brüche zu ihrer Lage im Seil erfolgte im Anschluss an die Versuche durch Öffnung bzw. Zerlegung der Seile. Für diese Untersuchungen wurden auch die Vergussbereiche freigelegt und untersucht.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Durchführung aller Bauteilversuche wird voraussichtlich noch die erste Jahreshälfte 2012 in Anspruch nehmen.



Die ersten Versuchsergebnisse wurden bereits parallel zu den Versuchen durch das Ingenieurbüro Dr. Schütz Ingenieure ausgewertet. Daraus sind auch jeweils die Vorgaben für die nächsten Versuche entwickelt worden.

Schwerpunkt bei der Durchführung der nächsten Versuche wird es sein, den Nachweis der Einsetzbarkeit von Seilen für die Instandsetzung der oben genannten Straßenbrücke zu erbringen. Dazu erfolgt eine versuchstechnische Simulation der am realen Bauwerk zu erwartenden Beanspruchungen im Seil. Die Bestimmung dieser Beanspruchungen erfolgte bereits vorab über rechnerische Untersuchungen an einem räumlichen Tragwerksmodell der Brücke.

Ein Abschluss des Vorhabens wird zum Ende des Jahres 2014 angestrebt.

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 γ_F | Bemessungswert der Einwirkungen S_D [kN] | Teilsicherheitsbeiwert γ_M [Beanspruchbarkeit: $R_D = f_{y,k}/\gamma_M$ ¹⁾ |
|-------------|---|-----------------------------------|--|--|
| Poller | 200 | 1,5 | 300 | 1,1 |
| Halteringe | 100 | 1,5 | 150 | 1,1 |
| Verankerung | 300 | 1,5 | 450 | 1,1 |

¹⁾ $f_{y,k}$... 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 Schiffsgößenverteilung begründbar modifizieren lassen. Grundlage für den Vergleich mit den Festlegungen des aktuellen Regelwerks bildet dabei die Auswertung und Umsetzung entsprechender Fachliteratur, die Ermittlung zutreffender Schiffsgößenverteilungen 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 Zapfeneinpassungsformen in den Pollerstuhl berücksichtigen.

3 Ergebnisse

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

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

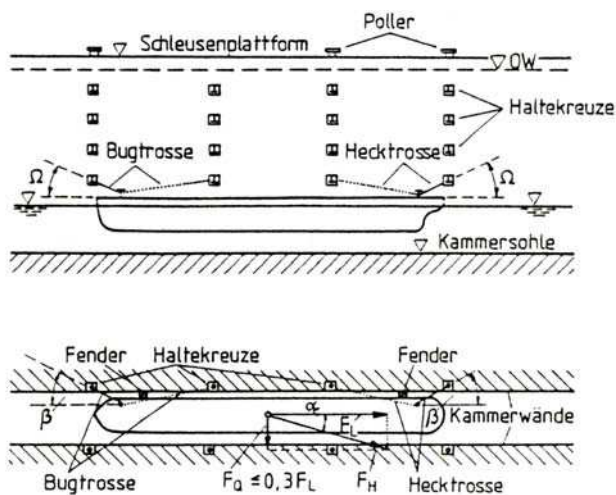


Bild 1: Längs- und Querkräfte auf ein schleusendes Schiff, Krafrichtungen (Quelle: Partensky, H.W.: Ausrüstungselemente von Binnenschiffsschleusen)

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, Spannen und Lösen der Trossen an Nischenpollern während realer Schleusungsvorgänge 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 2: Typische Situationen beim Festmachen, Spannen 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 $P_{z,d} \approx 200$ 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.

Bei den durch die Bremskräfte des Schiffes verursachten maßgeblichen Belastungen wird der Haltebolzen (Pollerzapfen) unabhängig von der Lastrichtung am stärksten beansprucht.

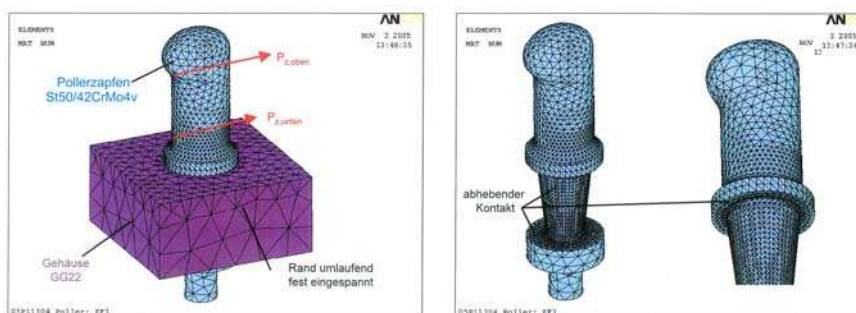


Bild 3: Vernetztes Volumenmodell Konstruktionsform 1 (konischer Zapfen aus St 50 bzw. Vergütungsstahl) mit Randbedingungen

Zur genaueren Beurteilung des Tragverhaltens wurden deshalb für einen besonders häufig verwendeten Nischenpollertyp mit dem Programmsystem ANSYS nichtlineare FEM-Berechnungen für unterschiedliche Lastfälle, Materialkombinationen und Pollergeometrien aufgestellt (Bild 3). Zu dem mit der Frage des Trossenzugansatzes in direktem Zusammenhang stehenden Umrüstungsbedarf an Pollern der Binnenschiffahrtsschleusen wurden in einem bereits im Dezember 2007 an das BMVBS gegebenen BAW-Bericht Entscheidungsgrundsätze benannt.

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. Die Fertigstellung des Berichts musste wegen anderer dringlicherer Projekte nochmals verschoben werden. Als ein mit dem Trossenzugansatz für Poller in den Schleusenammern in sehr engem Zusammenhang stehendes Problemfeld hat sich in letzter Zeit der für Dalbenpoller zu treffende Lastansatz aufgetan, wo sich künftiger Untersuchungsbedarf abzeichnet.

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-Vorhabens, 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 2012 abgeschlossen.

Korrosionsschutz mit Blatt 87 - Untersuchungen zu Zwischenhaftungs- und Farbproblemen

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

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

Es wird anvisiert, unter den gegebenen Umständen – Komplettbeschichtung im Werk nicht möglich – eine gute Qualität des Korrosionsschutzes mit Blatt 87 oder Varianten davon zu erzielen. Hierzu sind Variationen zum bisher üblichen Applikationsablauf, unter Einsatz „neuer“ Stoffe (z.B. Zwischenbeschichtung aus UV-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 stützen sich auf unterschiedliche Vorgehensweisen, d.h. sowohl auf Labor- wie auch Bauwerksuntersuchungen:

In einem Praxisversuch werden seit 2010 an der Haus-Kannener-Brücke, Datteln Beschichtungssystemvarianten getestet.

Die Resultate einer früheren Versuchsserie (Untersuchungen der Deutschen Bahn, BAST und BAW zwischen 1986 und 1996, [Binder, G., 1996]) wurden nochmals kritisch betrachtet und die dazugehö-

renden Prüfbleche mit verfeinerten Untersuchungsverfahren hinsichtlich des Haftverbundes, nachgemessen. Die Entwicklung der Haftfestigkeit wurde im zeitlichen Verlauf mit den klimatischen Randbedingungen verglichen.

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

3 Ergebnisse

Durch einen Hersteller wurden Prüftafeln mit zugelassenen Systemen nach Blatt 87 und Blatt 97 („Blatt 88“ stellt dabei eine noch nicht zugelassene, modifizierte Variante von Blatt 87 dar) unter Aufsicht bis zur Zwischenbeschichtung (ZB) im Technikum hergestellt und danach bewittert. Hierbei konnte schon nach zwei Monaten Freilandbewitterung sowohl bei Blatt 87 als auch Blatt 97 eine deutliche Vergilbung der EP-ZB wahrgenommen werden. Das Beschichten der Deckbeschichtung (DB) erfolgte nach zwei bzw. vier Monaten Zwischenbewitterung (Freilandlagerung in Karlsruhe gemäß DIN 55665). Die Auswertung der Blasenbildung (m = Häufigkeit, g = Größe) nach dem sogenannten ΔT -Test (DIN EN ISO 6270-1) zeigte folgende Tendenzen:

- Blatt 87 zeigt Blasenbildung entsprechend m3 / g1
- Blatt 97 zeigt Blasenbildung entsprechend m4 / g3
- „Blatt 88“ zeigt keine Blasenbildung (m0 / g0).

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

Die Resultate im Korrosionstest (neutraler Salzsprühnebeltest, DIN EN ISO 9227; 2.160 h) zeigten bei allen Serien einen guten bis ausreichenden Korrosionsschutz.

Im Rahmen des Neubaus der Haus-Kannener-Brücke Nr. 59 wurden zudem größere Versuchstafeln (ca. 100 x 60 cm) angefertigt. Diese wurden entsprechend der Zeitabfolge an den Brückenbauteilen mit wechselnden Schichtaufbauten (Produkte weiterer Hersteller, u.a. mit zugelassenem Blatt 87 - System) versehen und nach vier Wochen, bzw. einem Jahr Standzeit auf Bruchbildung mittels Haftabzug untersucht. Die Resultate zeigen folgende Tendenzen (Brüche in der DB sind als unkritisch zu betrachten):

- Blatt 87 (DB vor Ort beschichtet) zeigt starke Bruchneigung in ZB/DB
- Blatt 87 (DB im Werk beschichtet) zeigt nur Brüche in DB
- Blatt 87 (ZB und DB vor Ort beschichtet) zeigt nur Brüche in DB
- „Blatt 88“ (DB nur vor Ort beschichtet) zeigt nur Brüche in DB

Untersuchungen an der Brücke Nr. 474 (Bereich Helmstedt), welche vor fünf Jahren mit dem „Blatt 88“-System beschichtet worden ist, zeigten zufriedenstellende Ergebnisse.

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

Untersuchungen zum Nachweis der Abbauprodukte des Epoxidharzes bei der Zwischenbewitterung zeigten Hinweise zu Analysemöglichkeiten auf – ein zweifelsfreier Nachweis bei geschädigten Flächen des Haftverbundes ist derzeit allerdings nicht möglich. So waren z.B. Versuche zum Nachweis der EP-Abbauprodukte mit colorimetrischen Farbreaktionen auf Basis der carbonsäurekatalysierten Entfärbung von Metylenblau bzw. Nilblau durch Titan(III)-chlorid schwer reproduzierbar und wenig prakti-

kabel. Durch Aufarbeitung von Waschwässern der Blatt 87-Freibewitterungsversuche konnten aber keine Abbauprodukte wie Isophthalsäure oder Oxalsäure isoliert und IR-spektroskopisch nachgewiesen werden.

Hinsichtlich der Farbgebung für das SHW Niederfinow II konnte mit Farbabstandsmessungen (z.B. RAL 1004 Goldgelb) an verschiedenen Beschichtungsvarianten das stabilste Produkt mit anorganischer Pigmentierung ausgewählt sowie eine Empfehlung für die QS ausgesprochen werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Für das „Versuchsobjekt“ Haus-Kannener-Brücke Nr. 59 ist eine weitere Beobachtung, insbesondere der Prüfplatten, vorgesehen. Ebenso wird die Brücke Nr. 474 hinsichtlich der Langzeitwirkung des Korrosionsschutzes nach „Blatt 88“ beobachtet.

Die Resultate der Korrosionsschutztests an allen Laborprüfplatten sind abgeschlossen und werden zusammengestellt.

Veröffentlichungen [Binder, G. 2007; Binder, G. et al., 2012] und Vorträge zu den Untersuchungsergebnissen haben das Problembewusstsein der Bauherren, Ausführenden, Überwacher und letztlich Stoffhersteller geschärft. Über die BAST-Arbeitsgruppe 2.5 (ZTV-ING) wird versucht, das „Blatt 88“ in den TL/TP-KOR-Stahlbauten zu etablieren, bzw. die 2K-PUR-Zwischenbeschichtung (für die Ausführung vor Ort) im Blatt 87 zu integrieren (siehe Tabelle)

Die Farbabstandsmessungen bei BAW werden zwischenzeitlich weitergeführt. Hierbei ist zu prüfen, inwieweit Testreihen nach UV- und Xenon-Test sowie Naturlagerung zu vergleichen sind bzw. von einander abweichen.

5 Literatur

- Gelhaar, A. und Schneider, A.: Zur Problematik der Zwischenbewitterung von Epoxidharz-Teilbeschichtungen an Brückenbauten; Stahlbau, 76 (2007) Heft 2, 131-142
- Öchsner, W. P. und Schmidt, R.: Auf der Suche nach optimaler Zwischenhaftung; Farbe und Lack, 113 (2007) Heft 5, 146-155
- Binder, G.: Zwischenreinigung von bewitterten Teilbeschichtungen für den Korrosionsschutz an Brückenbauten; BAW-Brief (1996) Nr. 3, 2-3
- Binder, G.: Korrosionsschutz für den Stahlhochbau; BAW-Brief (2007) Nr. 1, 1-7
- Binder, G. und Baier, R.: Untersuchungen zu Zwischenhaftungsproblemen bei Korrosionsschutzbeschichtungen für den Stahlhochbau; BAW-Brief (2012) Nr. 2 (in Druck)

Tabelle 1: Vorschlag zur Integration einer 2K-PUR-Zwischenbeschichtung in Blatt 87

| Beschichtungsstoffe auf Epoxidharz- und Polyurethangrundlage | | | Blatt 87 EP/PUR Vorschlag 12/12 | |
|--|----------------------------------|---|--|-----------------|
| 1 Zusammensetzung im Anlieferungszustand Prüfung nach Anhang D Nr. 1 | | | | |
| Stoff-Nr | Farbe RAL oder Bezeichnung | Zusammensetzung der Pigmente bezogen auf 100 Masse-% Pigmente | Masse-%-Anteil | |
| | | | Binde- mittel | Löse- mittel |
| 1.1 Beschichtungsstoffe für Grundbeschichtung (GB) | | | | |
| 687.03 | grau | ≥ 94 % Zinkstaub, Rest: Füllstoffe** | 7 - 10 | ≤ 20 |
| 1.2 Beschichtungsstoffe mit Eisenglimmer für Zwischenbeschichtung (ZB) | | | | |
| 1.2.1 Beschichtungsstoffe mit Eisenglimmer für Zwischenbeschichtung auf Epoxid- ¹⁾ bzw. PUR-Grundlage ²⁾ | | | | |
| 687.12 ¹⁾ | grau DB 702 | ≥ 75 % Eisenglimmer Rest: Tönpigmente und Füllstoffe bezogen auf 100 Masse-% Pigmente* | 18-24 | ≤ 32 |
| 687.60 ²⁾ | grün DB 610 | ≥ 75 % Eisenglimmer; Rest: Al, Tönpigmente und Füllstoffe* | 24-30 | ≤ 35 |
| 1.3 Beschichtungsstoffe für Deckbeschichtung (DB) | | | | |
| 1.3.1 Beschichtungsstoffe mit Eisenglimmer für Deckbeschichtung auf PUR-Grundlage | | | | |
| 687.51 | blau DB 501 | ≥ 75 % Eisenglimmer Rest: Tönpigmente, Aluminium und Füllstoffe* | 24-30 | ≤ 35 |
| 687.52 | blau DB 502 | ≥ 75 % Eisenglimmer Rest: Tönpigmente und Füllstoffe* | | |
| 687.53 | blau DB 503 | | | |
| 1.3.2 Beschichtungsstoffe ohne Eisenglimmer für Deckbeschichtung auf PUR-Grundlage | | | | |
| 687.82 | himmelblau RAL 5015 | dem Hersteller überlassen | 30-40 | ≤ 35 |
| 687.89 | orientrot RAL 3031 | | | |

* Eisenglimmergehalte jeweils bezogen auf Pigmentanteil (35 bis 50 Masse-%); ¹⁾ bei Komplettschichtung im Werk, ²⁾ bei Deckbeschichtung auf Baustelle

Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Schleusentoren aus Faserverbundwerkstoffen

Netzplan-Nr.: A39510270001

Projektleiter: BOR U. Enders, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau, 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 Stemmtoflügeln 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 der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) ein kontinuierlicher Erneuerungsbedarf. Die Möglichkeit des Einsatzes von modularen und standardisierbaren 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 angepasst wird. Im Randbereich der Stemmorkonstruktion an den Wende- und Schlagsäulen sowie an den Drempeldichtungen sind metallische U-Profile vorgesehen, die als flächige Krafteinleitungselemente und als Dichtungsaufleger funktionieren.



Bild 1: Bauraumgerechte Gestaltung der Torflügelform

Für die Umsetzung der im Lastenheft aufgeführten Anforderungen an ein Schleusenstemma wurde eine FKV-Konstruktion (FKV – Faser – Kunststoff - Verbund) eine leichte und werkstoffgerecht gestaltete Sandwichbauweise entwickelt (siehe Bild 2).

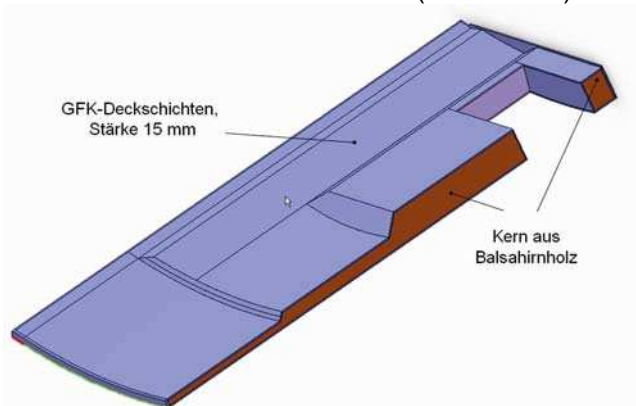


Bild 2: Schnitt durch die 6 m hohe Referenzkonstruktion

Die „Außenhaut“ der Konstruktion besteht aus einem 15 mm dicken, glasfaserverstärkten Epoxid-Laminat, mit symmetrischen Lagenaufbau im ausgeglichenen Winkelverbund und besitzt damit quasii-sotrope Werkstoffkenngrößen. Durch ein hochwertiges Epoxidharzsystem ist die geforderte Wasserbeständigkeit gewährleistet. Die UV-Beständigkeit wird mit im Bootsbau üblichen Lackschichtsystemen gesichert. Die Wartungsintervalle der Faserverbundkonstruktion sind gleichwertig zu konventionellen Stahlkonstruktionen.

Der komplett vom Laminat umschlossene Kernwerkstoff besteht aus Balsahirnholz, welches belastungsgerecht in unterschiedlicher Schichtdicke eingebracht wird. Balsa ist ein nachwachsender, in der Faserverbundtechnik bewährter Werkstoff, der mittlerweile in verschiedensten Anwendungsgebieten, so auch im Schiffbau, verarbeitet wird.

Die Masse der Torflügel reduziert sich aufgrund der Leichtbauweise im Vergleich zu einer konventionellen Stahlkonstruktion um ca. 50 %. Die vorhandenen Hals- und Spurlagerkonstruktionen werden weiter verwendet. Die Lastabtragung in Stemmstellung erfolgt jedoch nicht wie gewohnt über Knaggen, sondern kontinuierlich über die gesamte Länge von Wende- und Stemmsäule.

Für die Lastfälle (Betrieb, Revision, Eisdruck und Eigenlast) wurde unter Berücksichtigung des anisotropen Verbundmaterials statische Analysen (ANSYS) ausgeführt. Die ermittelten Beanspruchungen

der Struktur (Balsaholzkern und Laminat) liegen weit unterhalb der zulässigen Werte (siehe Tabelle 1). Auch die Lasten aus Eisdruck können schadfrei abgetragen werden. Alle Forderungen des Lastenheftes werden erreicht.

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. Sie ist in dieser Hinsicht einer Stahlkonstruktion ebenbürtig und durch am Markt etablierte Fachbetriebe problemfrei herstellbar.

Ergebnis 2: Eine erste Vorkostenanalyse ergab, den Verdacht auf eine im Rahmen einer Kleinserienfertigung wirtschaftlich herstellbaren Konstruktion.

Die Ergebnisse wurden auf dem BAW-Kolloquium „Stahl(wasser)bau – Wohin geht der Weg?“ vorgestellt. Es erfolgten Sondierungsgespräche über die Möglichkeit eines prototypischen Einsatzes einer solchen 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 Stemmtoren an Nebenwasserstraßen der WSV. Im Resultat dieser Untersuchungen wird deutlich, dass ein GfK-Tor vorerst in der Herstellung teurer (ca. 10 T€), jedoch im Betrieb, hier hauptsächlich die Kosten für die Beschichtungserneuerung betrachtend, über die Standzeit von 70 Jahren ca. 40 T€ günstiger als eine vergleichbare Stahlkonstruktion ist. Dabei sind Vorteile wie das geringere Gewicht (50 %) und die deutlich reduzierte Konstruktionsoberfläche noch nicht berücksichtigt. Durch die präferierte „Einheitstorkonstruktion“ werden sowohl bei der Planung/Ausschreibung als auch bei der Herstellung auf Grund der vorhandenen Standardisierung deutliche Einsparungen erwartet.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Mit dem erfolgreichen Abschluss der Projektphase Machbarkeit sowie der ausgeführten Wirtschaftlichkeitsanalyse soll nach einer positiven fachpolitischen Entscheidung der WSV das Vorhaben in die Phase eines Pilotprojektes überführt werden. Dazu soll die detaillierte Konstruktion für ein einheitliches Faser-Verbund-Stemmtor einschließlich der Entwicklung aller notwendigen Anbauteile und die Ausfertigung entsprechender Ausschreibungsunterlagen vergeben werden.

Korrosionsschutz von Stahl in Beton - Untersuchungen zum Kathodenschutz der Straßenbrücke B500 über den Rhein bei Iffezheim**Netzplan-Nr.:** A39510270002**Projektleiter:** Dr. Günter Binder, Roland Baier, Bautechnik, Referat B2;
Christian Tritschler, WSA Freiburg**E-Mail:** guenter.binder@baw.de**1 Problemstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

Mit dem Untersuchungsprogramm werden grundsätzlich, durch genaue Verfolgung der Messdaten vor Ort, Erfahrungen für die WSV gesammelt. Zudem kann man durch die Verfolgung des Wechsels der

äußeren Bedingungen, deren Einfluss auf die Erfassung der Messdaten und deren Interpretation, erkennen und zukünftig den Aussagewert z.B. der Potentialfeldmessung verbessern.

2 Untersuchungsmethoden

Nach dem Anschließen aller Anoden wurden gezielt Versuche gefahren, die Aufschluss über die letztendliche Anodenanordnung, Treibspannung, Stromdichte und Auslegung der Kathodischen Schutzanlage liefern sollten. Eine noch nicht im Detail bekannte Größe ist die exakte Einordnung der gemessenen Potentialwerte. Neben der Betonart (Bindemitteltyp) und der Betondeckung gelten die Temperatur und die Feuchtigkeit als maßgebliche Einflussparameter. Zur Verfolgung der variierenden Feuchtegehalte ist eine neuartige Ringelektrode eingesetzt worden. Die Multiringelektrode bestehen aus acht Edelstahlingen (1.4571, $d = 20,0$ mm, $h = 5$ mm), die mit einem Achsabstand von 5 mm untereinander angeordnet sind und mit einem pt1000 Temperaturfühler. Zwischen zwei Edelstahlringen wird jeweils ein Polyethylen-(PE)-Isolierring eingebaut. Durch Messung des Wechselstromwiderstands (100 Hz bzw. 1000 Hz) zwischen zwei benachbarten Ringen kann ein Widerstandsprofil über die Einbautiefe des Sensors aufgezeichnet werden, das unter Verwendung von Kalibrierkurven in ein Feuchteprofil umgerechnet werden. Dabei ist eine Temperaturkompensation der gemessenen Betonwiderstände $[\Omega]$ mit Hilfe der Betontemperatur (gemessen auf Höhe des innersten Rings), eine Umrechnung in spezifische Elektrolytwiderstände $[\Omega \cdot m]$ über die Zellkonstante k möglich. Hierzu soll ggf. im Bereich der Anoden gezielt und kontrolliert Wasser, zur Erhöhung von Beton- und Luftfeuchte, eingebracht werden und dazu das veränderte Potential bestimmt werden. Ferner sollen vergleichende Potentialfeldmessungen von außen vorgenommen werden und deren Verschiebungen gegenüber den Messungen innen, nahe an der schlaffen Bewehrung, verfolgt werden. Auch eine stationäre konventionelle Messung der relativen Luftfeuchtigkeit des Innern der Hohlkästen mit einem Hygrometer ist zusätzlich vorgesehen.

3 Ergebnisse und weiteres Vorgehen

Im Frühjahr 2011 wurde die KKS-B-Anlage an der Straßenbrücke Iffezheim (B 500) in Betrieb genommen. Dabei wurde in zeitlichen Abständen die Funktionstüchtigkeit der Anlage durch Messungen der Potentialfeldwerte im Betrieb (s. Bild 1) bzw. der tatsächlichen lokalen Schutzwirkung durch die Ermittlung der Ausschaltpotentiale und der dadurch erzielten Depolarisation (> 100 mV) nach DIN EN 12969:2000-06 bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl an den diskreten Einzelanoden als auch in dem Bereich der Streckmetallgitteranode das 100 mV-Funktionskriterium für die gemessene Depolarisation nach 24 Stunden in der Regel erfüllt werden (s. Bild 2). Bei dieser Depolarisierungsmessung besitzen die einzelnen Bezugselektroden einen nach 24 Stunden parallel verschobenen Verlauf; wobei in seltenen Fällen vereinzelte Potentialwerte lokal auseinanderdriften. Treibspannung (4,45 V) und Schutzstrom stehen ebenfalls als grundlegende Kenngrößen für die Auswertung zur Verfügung.

Da besonders der Betonwiderstand und die Stromstärke der lokalen Schutzströme durch Temperatur und Feuchte beeinflusst werden, müssen zusätzlich die Temperatur und die Luftfeuchte, bzw. vor allem die Betonfeuchte, gleichzeitig erfasst werden. Zur Kontrolle von Feuchteverteilung in der Betonrandzone sind jeweils am Anfang und Ende des östlichen und westlichen Hohlkastens je zwei „Multiringelektroden“ angebracht worden. Aus den Langzeitbetrachtungen sind insbesondere die Einflüsse der Temperatur, Feuchtigkeit und der Betondeckung auf die Potentialfeldmesswerte wie auch letztlich auf die Stromverteilung bzw. den benötigten Schutzstrom abzuleiten bzw. zu bestimmen.



Bild 1: Funktionsprüfung an installierten diskreten Fremdstromanoden

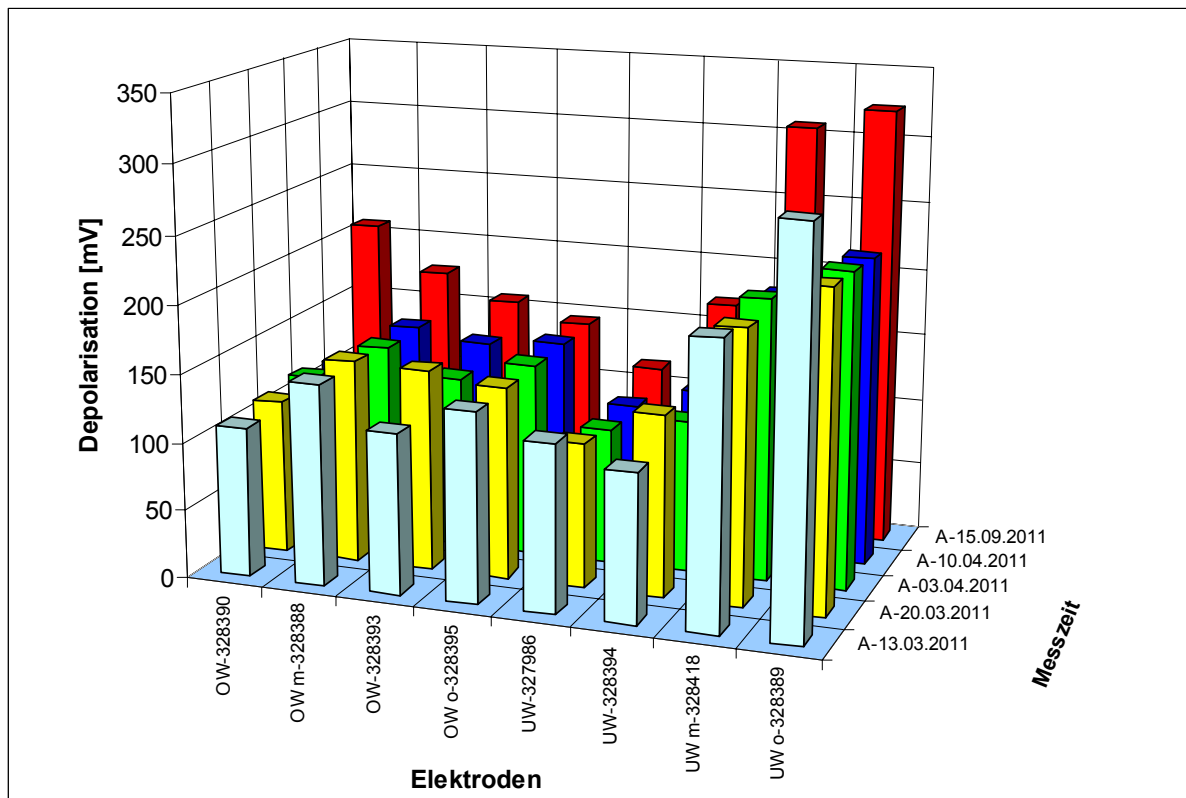


Bild 2: Graphische Darstellung der erzielten Depolarisationswerte der Hohlkastenwand (östliche Seite; OW = Oberwasserseite; UW = Unterwasserseite)

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- Betrachtung und Auswertung vorliegender Messwerte zur Erfolgskontrolle an der Versuchsanlage Straßenbrücke Iffezheim - B500 (2011-2014)
- Messung der Potentiale nach dem Einbau der Kathodenschutzanlage, Überprüfung der Funktionsfähigkeit durch Bestimmung des Ausschaltpotentials durch Erfüllung des 100-mV-Kriteriums (2011-2013)
- Verfolgung der Potentialmesswerte durch naturbedingte Wechsel der Temperatur und Feuchtigkeit (2012-2014)
- Messwertverfolgung nach künstlicher Anhebung der Betonfeuchte durch Rehydratisierung nach Wasserbauaufschlagung (2012-2013).

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

Bruns, M., Becker, H., Tritschler, C. und Binder, G.: Kathodischer Korrosionsschutz im Beton - Erfahrungen an der Straßenbrücke Iffezheim; Beton- und Stahlbetonbau, 104 (2009) 11, 763-772

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 concept). Angesichts der rasanten technischen Entwicklung auf dem Baustoffsektor, eines grenzüberschreitenden europäischen Marktes und einer im Verkehrswasserbau im Vergleich zu Betonbauwerken nach DIN 1045 auf bis zu 100 Jahre verlängerten Nutzungsdauer wird es 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 215 und 219) auf nationaler Ebene die für die Anwendung des performance concept notwendigen Frostprüfverfahren und Abnahmekriterien festgelegt worden. Von maßgeblicher Bedeutung für die Intensität eines Frostangriffes auf Beton und damit auch für Prüfverfahren und Abnahmekriterien sind die Temperaturbeanspruchung und der Wassersättigungsgrad des jeweiligen Betons. Über die Größenordnung beider Parameter im Bauwerk 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 Frostwiderstands des Betons eine erhebliche Bedeutung zu.

1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen des Forschungsvorhabens werden im Wesentlichen folgende Ziele verfolgt:

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

2 Untersuchungsmethoden

Das Forschungsvorhaben ist in drei parallel zu bearbeitende Teile gegliedert:

Teil I:

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

zogenen Betone. Zur Bestimmung der Porenstruktur werden insbesondere die Wasseraufnahmen unter Atmosphärendruck und unter Druck von 15 N/mm² sowie die Quecksilberdruckporosimetrie eingesetzt. Als Frostprüfverfahren wird das in der ZTV-W LB 219 (1997) (aktuell im BAW Merkblatt „Frostprüfung von Beton“) beschriebene CIF-/CDF-Verfahren herangezogen. Der Großteil der Untersuchungen wird von der BAW selbst durchgeführt. 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 wurden u. a. die bei der Begutachtung der Schleusenanlage Eckersmühlen gewonnenen Ergebnisse ausgewertet. Zur Bestimmung des sich tatsächlich in der Betonrandzone von Verkehrswasserbauwerken in verschiedenen Tiefenhorizonten einstellenden Feuchtigkeitsgehaltes werden gemeinsam mit der RWTH Aachen Untersuchungen an einem neu zu errichtenden und an einem bestehenden Bauwerk durchgeführt. Als Messeinrichtungen wurden Temperaturfühler und Multi-Ring-Elektroden in den Beton eingebaut.

Teil III:

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

3 Ergebnisse

Teil I:

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

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. Danach sind jahreszeitliche Schwankungen des Sättigungsgrades in den Expositionen unter mäßiger Sättigung (XF1) wesentlich stärker ausgeprägt als unter hoher Sättigung (XF3). Hohe Sättigungsgrade treten in den Expositionsklassen XF1 und XF2 als seltene Spitzenwerte auf, an die sich in der Regel eine Trocknungsphase anschließt. Bei Bauteilen mit ständigem oder periodischem Wasserkontakt wie beispielsweise Schleusen lag der Sättigungsgrad des Randbereiches in der Wasserwechselzone hingegen weitgehend konstant und entsprach etwa der betonspezifischen Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck. Derart hohe Wassersättigungsgrade in Verbindung mit ausgeprägten Temperaturände-

rungen infolge betriebsbedingter Wasserstandsänderungen führen bei Verkehrswasserbauwerken zu Frostbeanspruchungen, die für deutsche Gegebenheiten dem pessimalen Bereich zuzuordnen sind.

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 und in 2010 als DAfStb-Heft publiziert.

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 2011 weitergeführt und anschließend ausgewertet werden. Eine Fortführung der Datenaufzeichnung über diesen Zeitraum hinaus ist vorgesehen. Die Auslagerung der Prüfkörper im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein wird bis 2013 fortgeführt. Im Anschluss werden durch die RWTH Aachen an den Prüfkörpern abschließende Laboruntersuchungen durchgeführt und ausgewertet. Die XF3(horizontal)-Platte soll im Jahr 2011 hergestellt und an der Schleuse Hilpoltstein ausgelagert werden.

Zeitplan:

Der Abschluss des Gesamtvorhabens und die Erstellung des FuE-Berichtes werden im Jahr 2012 erfolgen. Die über 2012 hinausgehenden Aktivitäten (längerfristige Beobachtungen der ausgelagerten Prüfkörper, des Fertigteils und der horizontalen XF3-Platte sowie die Datenaufzeichnungen an den Schleusen Hohenwarthe und Hilpoltstein) werden ggf. im Rahmen eines Folgevorhabens durchgeführt.

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 wird¹. Andererseits wurden einige Instandsetzungssysteme in ihren Eigenschaften z. T. so modifiziert, dass auch bei Altbetonen geringerer Güte ein guter und dauerhafter Verbund sichergestellt wurde², 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.

1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens soll die Eignung von Instandsetzungssystemen getestet werden, die ggf. beide Eigenschaften (schnell erhärtend und dünnschichtig) vereinen. Bei entsprechendem

¹ Probeinstandsetzung Schleuse Feudenheim 2002/2003

² Feldversuch der IMF AG/ StoCretec GmbH an der Schwarzatal Sperre 1998 und 2002

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 m², 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 m² im Rahmen eines Technologieversuches hergestellt werden. Dabei soll neben der Materialeignung auch die Frage der Applikation (Spritzbeton oder Ortbeton) untersucht werden, was ggf. mit der Entwicklung spezieller Schalungssysteme verbunden ist. Aus den Probeflächen werden wiederum Proben entnommen und bezüglich der wasserbauspezifischen Anforderungen im Baustofflabor geprüft.

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

3 Ergebnisse

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

Im Sommer 2005 wurden auf die ersten vier Teilflächen á 2,5 m x 2,0 m unterschiedliche Instandsetzungsmörtel SPCC mit an die geringe Betonqualität des Untergrunds angepassten Eigenschaften appliziert, welche z.T. hinsichtlich des Schwindverhaltens und E-Moduls modifiziert waren. Im Oktober 2009 wurde auf die fünfte Teilfläche á 2,5 m x 2,0 m ein schnell erhärtendes Material in Ortbetonbauweise (geschaltes System) aufgebracht. Das Material (ein SCC) war so konzipiert, dass es sich selbst verdichtet.

Die Flächen wurden in diesem Jahr erneut bewertet. Neben der augenscheinlichen Beurteilung auf Rissbildungen wurde das Verbundverhalten durch Prüfung der zentrischen Zugfestigkeit an aus den Probewänden entnommenen Bohrkernen untersucht. Das folgende Diagramm zeigt die Entwicklung der Verbundfestigkeiten im bisherigen Beobachtungszeitraum.

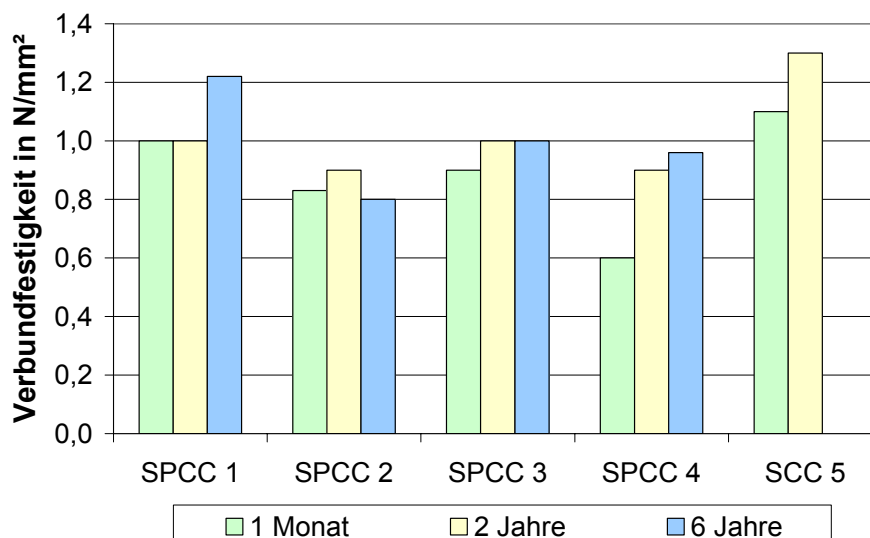


Bild 1: Entwicklung der Verbundfestigkeiten

Die Verbundfestigkeiten zeigen, dass es (mit Ausnahme des Materials SPCC 2) bislang zu keiner Verbundschwächung gekommen ist. Die spezielle Anpassung der Materialien im Hinblick auf die Begrenzung des Schwindens und E-Moduls hat sich demnach grundsätzlich bewährt.

Der bei dem Material SPCC 2 festgestellte geringfügige Rückgang ist vermutlich auf einen lokal schwächeren Untergrundbeton zurückzuführen (Druckfestigkeit Untergrundbeton $< 10 \text{ N/mm}^2$, Altbetonklasse A1), für welchen das Material nicht ausgelegt ist. Wie das Bruchbild einer Probe anhand des Abrisses unmittelbar hinter der Verbundebene exemplarisch zeigt, kann unter dieser ungünstigen Randbedingung eine Schwächung im Verbundbereich nicht ausgeschlossen werden. Die Verbundfestigkeit entsprach im vorliegenden Fall jedoch noch immer der Zugfestigkeit des Altbetons.



Bild 2: Bruchbild Verbundprobe SPCC 2 nach der Zugprüfung

Die andauernde Veränderung der Messwerte belegt, dass eine längerfristige Beobachtung wichtig ist, um belastbare Aussagen zur Dauerhaftigkeit treffen zu können. Daher werden die Flächen weiter beobachtet und beprobt, wobei der Probenumfang im Hinblick auf die Ungleichmäßigkeit des als Stampfbeton hergestellten Altbetons zu erhöhen ist.

Um bei der Applikation an alten Bauwerken typische größere Fehlstellen (z.B. Arbeitsfugen im Stampfbeton) überbrücken zu können, soll in einem Versuch zunächst der SCC mit einer nicht korrodierenden Bewehrung kombiniert werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Beobachtung und Beprobung der Versuchsflächen. Probefläche an einem Wasserbauwerk. Kombination mit einer geeigneten nichtkorrodierenden Bewehrung.

Eine Langzeitbeobachtung der geplanten Probeflächen an Bauwerken ist vorgesehen.

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] und der [ZTV W LB 215 bzw. LB 219] 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 Luftporenbetonoberflächen. 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 und Probekörperherstellung

Es wurden Luftporenbetone unter Variation des Bindemittels untersucht, deren Zusammensetzung die Anforderungen nach ZTV-W LB 215 bzw. LB 219 für einen Einsatz im Bereich von Schleusenkamerwänden erfüllt. 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 durch ein Transportbetonwerk geliefert und mit einem Betonierkübel eingebaut. Die Probekörper wurden nach den Vorgaben des BAW-Merkblattes „Früher Zwang“ an den senkrechten Flächen bewehrt. Weiterhin wurden Sensoren zur Erfassung der Temperatur und des Austrocknungsvorgangs in Abhängigkeit der Nachbehandlung installiert. Die Temperaturänderungen in der Randzone wurden mittels tiefengestaffelt messender Temperatursensoren erfasst und die Austrocknung der Probeflächen wurde indirekt über eine tiefengestaffelte Messung des Elektrolytwiderstand mittels Multiring-Elektroden (MRE) gemessen.

2.2 Wahl der Nachbehandlungsvarianten

Bei der Nachbehandlung wurde der Zeitraum des Belassens in der Schalung (Primärmaßnahme) variiert. Es kamen Holzträgerschalungen mit unterschiedlicher Schalhdauer zum Einsatz. Die Schalhdauer variierte zwischen einem und 14 Tagen. Zusätzlich wurden verschiedene baustellenübliche Sekundärmaßnahmen zur Verringerung der Austrocknung der Betonrandzone wie Nachbehandlungsmittel, Abhängen mit feuchter Jute und Folie sowie regelmäßiges Befeuchten der Betonoberfläche nach dem Ausschalen eingesetzt.

2.3 Bohrkernuntersuchungen

Um den Einfluss der eingesetzten Nachbehandlungsvarianten auf verschiedene dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften zu untersuchen, wurden etwa 5 Jahre nach Betonherstellung Bohrkern entnommen und mit verschiedenen Prüfmethode untersucht. 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.

3 Ergebnisse

3.1 Auswertung der Messdaten

Bei der Auswertung der Messdaten wurde der Schwerpunkt auf die ersten Tage nach der Herstellung gelegt. Mittels der Temperaturmessungen konnte sehr gut der anfängliche, durch frei werdende Hydrationswärme 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 sowie die Temperaturunterschiede der massigen im Vergleich zu schlanken Bauteilen. 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 Schaltafeln abgenommen werden. Bild 1 zeigt exemplarisch die unterschiedliche Auswirkung bei ein- und siebentägiger Schalhdauer anhand von tiefenabhängigen Widerstandsprofilen zu verschiedenen Zeitpunkten. Insbesondere der Bereich bis etwa 10 mm ist vom Austrocknungsvorgang betroffen.

3.2 Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen

Zur Einordnung des Einflusses der Nachbehandlung sind in Bild 2 exemplarisch der Permeabilitätskoeffizient, der Wasseraufnahmekoeffizient und der Chloridmigrationskoeffizient zur Beschreibung verschiedener Transportmechanismen in Abhängigkeit der Nachbehandlungsart und -dauer sowie die ermittelte Karbonatisierungstiefe dargestellt.

Eine Verkürzung der Schalhdauer kann dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften wie beispielsweise den Karbonatisierungswiderstand oder die Wasseraufnahmefähigkeit als Ursache zahlreicher Schädigungsprozesse beeinflussen. Positive Effekte wurden durch die Verwendung wasserabführender Schalungsbahnen erzielt. Die Untersuchungen wurden abgeschlossen und werden im Hinblick auf einen etwaigen Änderungsbedarf der Regelungen zur Nachbehandlung gemäß ZTV-W LB 215 bzw. LB 219 bewertet.

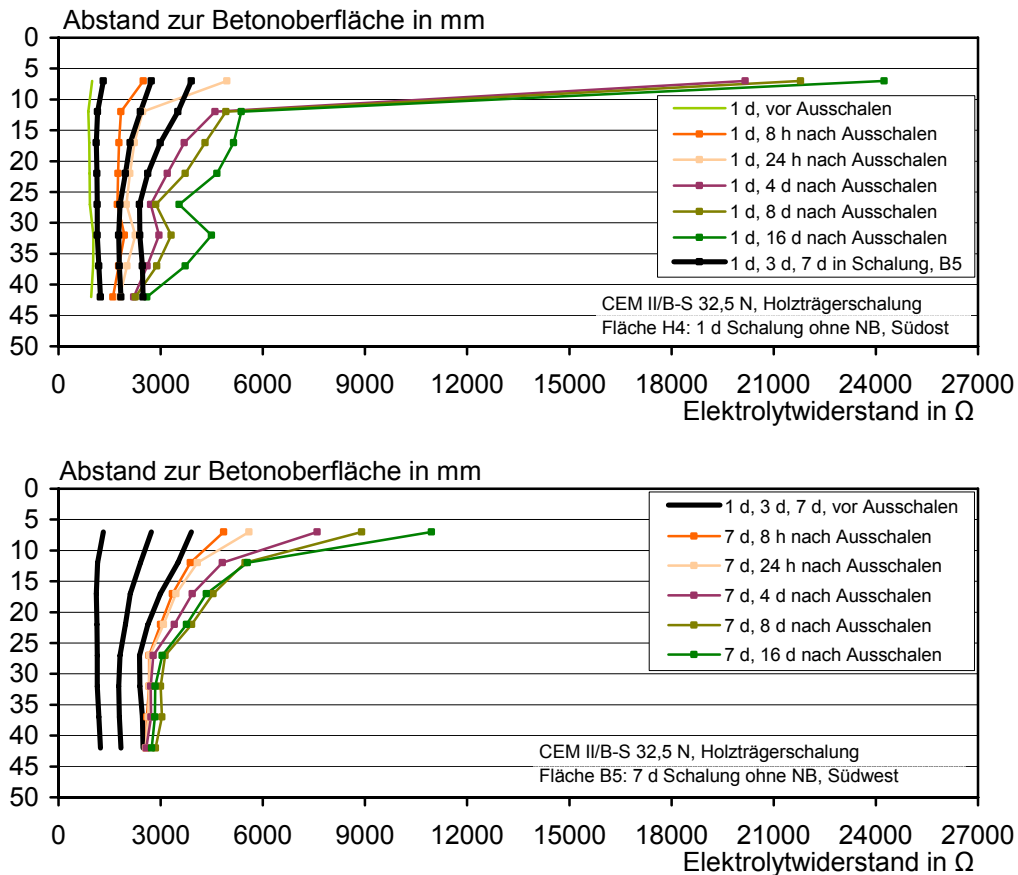


Bild 1: Widerstandprofile in Abhängigkeit des Ausschalzeitpunktes

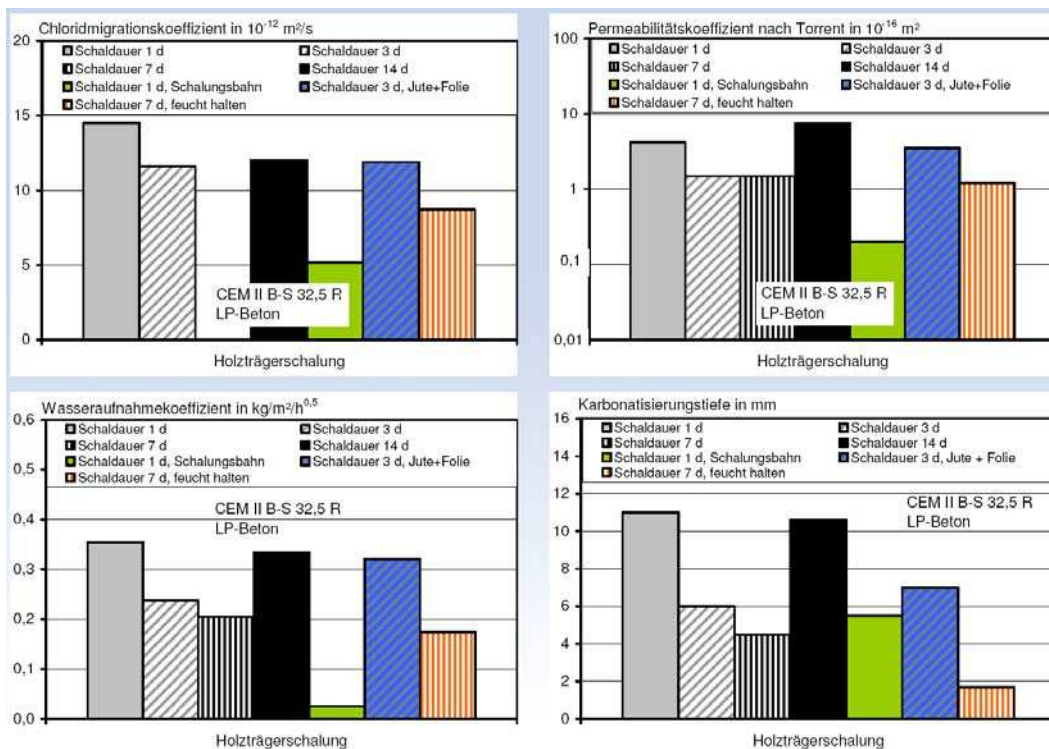


Bild 2: Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit der Nachbehandlungsart und -dauer

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Fertigstellung des Abschlussberichtes und Projektabschluss

5 Literatur

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

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215): Ausgabe 2004 + 1. Änderung Dezember 2008

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219): Ausgabe 2004 + 1. Änderung Dezember 2008

6 Veröffentlichungen

Spörel, F.; Müller, H.: Nachbehandlung massiger Betonbauteile. In: Tagungsband BAW-Kolloquium Baustoffe und Bauausführung im Verkehrswasserbau, 2009

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. Bei Betonen 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 vorhandene und neue quasi-adiabatische 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 mit 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

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

Erste 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 Thermolemente als Messaufnehmer eine geringere Messgenauigkeit aufweisen. 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 2012 vorgesehen.

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 Schleusenkamerwänden wird oft durch Vorsatzschalen vor Nassfrost- einwirkung und Witterungsbeanspruchung geschützt. In der Verbundzone kommt es durch eindrin- gendes 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 wer- den. Durch die Steuerung der Konsistenz und Aushärtungscharakteristika werden diese Injektionsma- terialien 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 sol- len Parameter für die Ausführbarkeit und Qualitätskontrolle solcher Arbeiten ermittelt werden.

2 Untersuchungsmethoden

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

In die vier Probeflächen wurden unterschiedliche Materialgruppen (Zementsuspension, Zementleim, Acrylatgel, PUR-Harz) injiziert. Die Injektionen werden durch ein umfangreiches Untersuchungspro- gramm, 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 ein- gebaut. An den Ausbruchflächen konnten die Struktur des Kernbetons mit seinen Fehlstellen aufge- nommen 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 und weiteres Vorgehen

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 veränderte 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

Erste Ergebnisse der Untersuchungen wurden beim 1. Kolloquium "Erhaltung von Bauwerken" der TAE Esslingen im Januar 2009 vorgestellt. Der Abschlussbericht soll bis Mitte 2012 vorliegen.



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

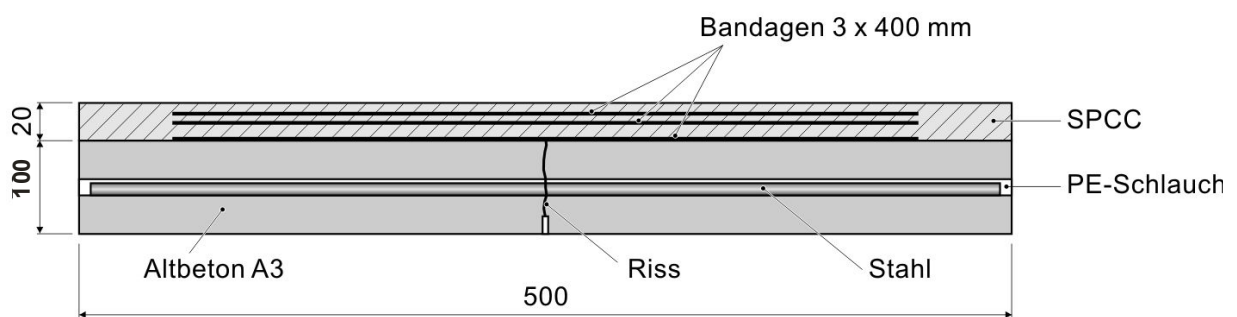
Teil 2: Untersuchungen auf Laborebene

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 Rissüberbrückungsprismen bestehen aus dem Grundkörperbeton A3 nach ZTV-W LB 219 und haben eine Breite von 120 mm. Die Dicke der Spritzmörtelschicht variiert 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

In 2010 wurden an Wehrpfeilern der Wehranlage Horkheim insgesamt acht Probeflächen unter Verwendung des bereits in den Laboruntersuchungen eingesetzten S-A3-Mörtels sowie verschiedener Arten von Textilbewehrung angelegt (Bild 2).

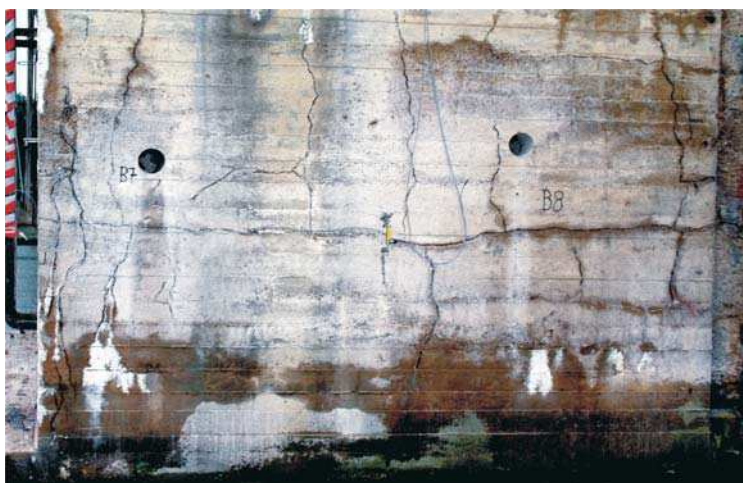


Bild 2: Pfeilerseitenfläche für Anlage einer Probefläche unmittelbar über Oberwasserstand

Die Wehrpfeiler weisen zahlreiche Risse und offene Arbeitsfugen auf. Die Rissbreiten liegen zwischen 0,1 und etwa 3,0 mm. Zur Erfassung der Rissbewegungen wurden Wegaufnehmer sowohl außerhalb als auch innerhalb der Probeflächen aufgebracht. Über Dehnungsmessstreifen (DMS) werden die Bewegungen im Instandsetzungssystem in Höhe der Textilien ermittelt. Die Daten werden kontinuierlich erfasst und mittels Modem übertragen. Die Probeflächen sollen mindestens ein Jahr lang beobachtet werden, um den Einfluss jahreszeitlich bedingter Rissbreitenänderungen im Betonuntergrund auf die verschiedenen Instandsetzungsvarianten erfassen zu können.

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 dünnschichtiger, textiltbewehrter Spritzmörtel und textiltbewehrter 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. 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).

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: Bei einer ersten visuellen Begutachtung etwa 2 Wochen nach Fertigstellung der Probeflächen zeigten sich keine Risse oder sonstige Auffälligkeiten. Die Messeinrichtungen zur Erfassung von Rissbreitenänderungen und Dehnungen funktionieren wie vorgesehen. Bei weiteren visuellen Begutachtungen im Frühjahr und im Herbst 2011 wiesen die Probeflächen ein unverändertes Bild auf.

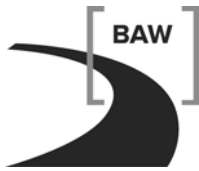
4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2011: Beobachtung der Probeflächen, Erfassung und Auswertung der Daten aus den Bauwerksmessungen

2012: Begutachtung der Probeflächen, Abschluss des FuE-Vorhabens, Erstellung FuE-Bericht.

5 Literatur

-/-



6 Veröffentlichungen

- Orlowsky, J.; Raupach, M.; Westendarp, A.; Öztürk, T.: Textilbewehrte Spritzmörtel zur Instandsetzung von Wasserbauwerken. In: Restoration of Buildings and Monuments, Vol. 17, Nr. 3/4, S. 181-190 (2011).
- Orlowsky, J.; Raupach, M.; Westendarp, A.; Öztürk, T.: Textilbewehrte Spritzmörtel zur Instandsetzung von Wasserbauwerken. In: beton 12/2011, S. 486-490.
- Orlowsky, J.; Westendarp, A.: Instandsetzung von Wasserbauwerken mit Textilbeton. Vortrag und Tagungsband 42. Aachener Baustofftag am 10.11.2011 in Aachen.
- Orlowsky, J.; Raupach, M.: Betoninstandsetzung mit textildbewehrtem Spritzmörtel. Vortrag und Tagungsband BAW-Kolloquium „Instandhaltung von Verkehrswasserbauwerken“ am 25./26.11.2011 in Karlsruhe.

Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken

Netzplan-Nr.: A39510310240

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

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

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

Es sind Bemessungskonzepte zu erarbeiten, die bei gegebenen Betoneigenschaften eine realistische Bewertung der 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 hat in den letzten Jahren zunächst mehrere universitäre Forschungsprojekte begleitet, mit dem Ziel, entsprechende Bemessungskonzepte unter besonderer Berücksichtigung wasserbauspezifischer Beanspruchungen zu erarbeiten. Zu nennen ist hier insbesondere das DAfStb-Verbundvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“, Teilprojekt D „Lebensdauermanagement“, da hier ein Software-Prototyp erarbeitet wurde, welcher vollprobabilistische Modelle impliziert. Damit können realitätsnahe Zustandsprognosen des Bauwerks direkt am dreidimensionalen Bauwerksmodell dargestellt werden. Durch Berücksichtigung von Untersuchungsergebnissen kann die Prognose zudem sukzessiv zugespitzt, durch die Anwendung zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden mögliche Schädigungen bereits frühzeitig erkannt und entsprechende Maßnahmen eingeleitet werden. Diese Vorgehensweise ist in der Schriftenreihe des DAfStb [Schießl, P.; Gehlen, C. et al, 2011] ausführlich dargestellt und erläutert.

Aktuell steht seit September 2011 im Rahmen einer Kooperation mit dem Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München die Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken für den Fall einer chloridinduzierten Bewehrungskorrosion im Fokus. Dieser Themenbereich wurde bislang im FuE-Vorhaben „Chlorideindringwiderstand von Beton“ bearbeitet, die im Rahmen dieses Vorhabens gewonnenen Erkenntnisse [Gehlen, C.; Fischer, C., 2007], [Gehlen, C.; Osterminski, K., 2009] werden übernommen. Die Zielsetzung der zukünftigen Aktivitäten wird in den zwei Bereichen „Neubaumaßnahmen“ und „bestehende Bauwerke“ verfolgt:

- Bei den Neubaumaßnahmen sollen zunächst die deskriptiven Regeln der Normung anhand vollprobabilistischer Modelle zum Erreichen angemessener Lebensdauer mit ausreichender Wahrscheinlichkeit angepasst werden.
- Für den Bereich bestehender Bauwerke sind Konzepte vorzugsweise auf der Grundlage semiprobabilistischer Ansätze (Teilsicherheitsbeiwerte) zur Beurteilung der Restnutzungsdauer bestehender Betonbauteile vor und nach einer Instandsetzungsmaßnahme zu erarbeiten. Die zu erarbeitenden Konzepte sind derart aufzubereiten, dass sie für den sachkundigen Planer anwendbar sind.
- In einem weiteren Schritt sind die erarbeiteten Bemessungskonzepte für bestehende Bauwerke auch auf eine Anwendung für Neubaumaßnahmen weiter zu entwickeln.

Dieses Forschungsprojekt wird von einer Betreuergruppe mit regelmäßigen Sitzungen fachlich begleitet.

Analoge Konzepte sollen später auch für den Fall carbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion sowie Betonkorrosion infolge Frostangriff entwickelt werden.

3 Ergebnisse

Im Rahmen der Überprüfung und Anpassung der deskriptiven Vorgaben der Normung für Neubaumaßnahmen wurden für Betonzusammensetzungen entsprechend der ZTV-W LB 215 für Bauteile der Expositionsklassen XS (Meerwasserbeaufschlagung) und XD (Beaufschlagung durch Taumittel) Zuverlässigkeitsanalysen durchgeführt. Dabei wurden vier unterschiedliche Betondeckungen von 60, 65, 70 und 75 mm und unterschiedliche Bindemittelarten in Betracht gezogen. Das folgende Bild zeigt exemplarisch die Ergebnisse der Analysen für einen CEM III/B-Beton unter der Exposition XS3. Dargestellt sind die erforderlichen (maximalen) Chloridmigrationskoeffizienten $D_{RCM,t0=56}$ für Lebensdauern (Zeitraum der Depassivierung der Bewehrung) bis zu 100 Jahren mit einem Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 1,5$.

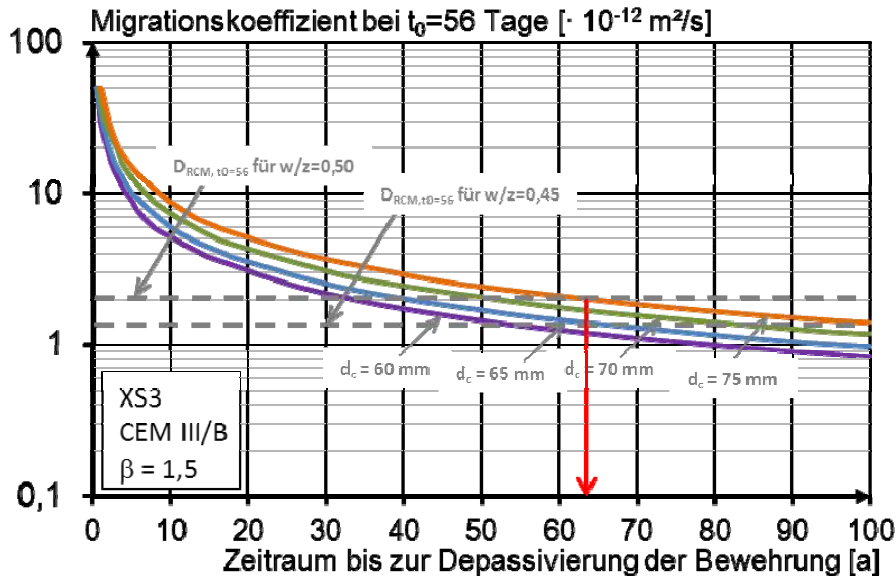


Bild 1: Erforderliche Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit der gewünschten Lebensdauer, Auswertung der Zuverlässigkeitsanalysen

Ein günstiger Einfluss der Betondeckung ist zu erkennen. Während bei einer Betondeckung von 75 mm ein Chloridmigrationskoeffizient des Betons von ca. $1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ zum Erreichen einer Lebensdauer von 100 Jahren genügt, ist bei einer Betondeckung von 60 mm – derzeitige Vorgabe der ZTV-W LB 215 – ein geringerer Wert von ca. $0,85 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ erforderlich. Im Diagramm sind die Mittelwerte der durch Laborversuche ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten verschiedener CEM III/B-Betone mit Wasserzementwerten von 0,45 und 0,50 dargestellt (gestrichelte Linien). Erkennbar ist, dass bei einem w/z -Wert von 0,50, relevant für massive Bauteile, mit einer Betondeckung von 75 mm eine Lebensdauer von nur ca. 62 Jahren erreicht wird (roter Pfeil). Diese liegt unter der in der ZTV-W LB 215 vorgesehenen Nutzungsdauer von 100 Jahren.

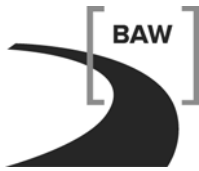
Aus den unter den o.g. Randbedingungen durchgeführten Zuverlässigkeitsanalysen wurden im aktuellen Gelbdruck der Neufassung der ZTV-W LB 215 entsprechende Anpassungen der deskriptiven Anforderungen (Zementarten, Flugascheanteile) für die Expositionsklassen XD und XS vorgenommen. Zudem wird künftig für Meerwasserbauwerke bei den Expositionsklassen XS2 und XS3 grundsätzlich eine Dauerhaftigkeitsbemessung gefordert, sofern die geplante Nutzungsdauer 50 Jahre übersteigt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die aktuellen Forschungsaktivitäten zur Erarbeitung der Bemessungskonzepte wurden im September 2011 begonnen. Die ersten Analysen für die Neubaumaßnahmen wurden bereits durchgeführt. Der Rahmenplan der Untersuchungen im Bereich bestehender Bauwerke wurde durch drei Sitzungen der Betreuergruppe festgelegt. Umfangreiche Untersuchungen durch systematische Laborversuche, Bauwerksanalysen und numerische Berechnungen und Analysen sind geplant. Die Laufzeit des Vorhabens ist bis Ende 2014 veranschlagt.

5 Literatur

- Schießl, P.; Gehlen, C. et al., (2011): Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ Lebenszyklusmanagementsystem zur Nachhaltigkeitsbeurteilung – Teilprojekt D. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 586. Beuth-Verlag, Berlin, 2011.
- Gehlen, C., (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510. Beuth-Verlag, Berlin, 2000.
- fib Bulletin 34: Model Code for Service Life Design, fib Task-Group 5.6, Entwurf 2006.



DAfStb: Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J.

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

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

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

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.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

In einem ersten Schritt 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 einem Geotextil, das für Geobags verwendet wird, wurde das Turbulenzprüfverfahren vergleichend mit der Prüfung nach ISO 12956 vor und nach einer Abriebbeanspruchung untersucht. Die Abriebbeanspruchung erfolgte in Anlehnung an das Prüfverfahren der RPG 1994. Es zeigte sich, dass das Turbulenzprüfverfahren im Gegensatz zu der Prüfung mit laminarer Strömung nach ISO 12956 den Einfluss der Abriebbeanspruchung erfasst. Bild 1 zeigt die Bodendurchgangskurven vor und nach der Abriebbeanspruchung. Die Ergebnisse wurden im Tagungsband der Konferenz 9th International Conference on Geosynthetics in 2010 vorgestellt.

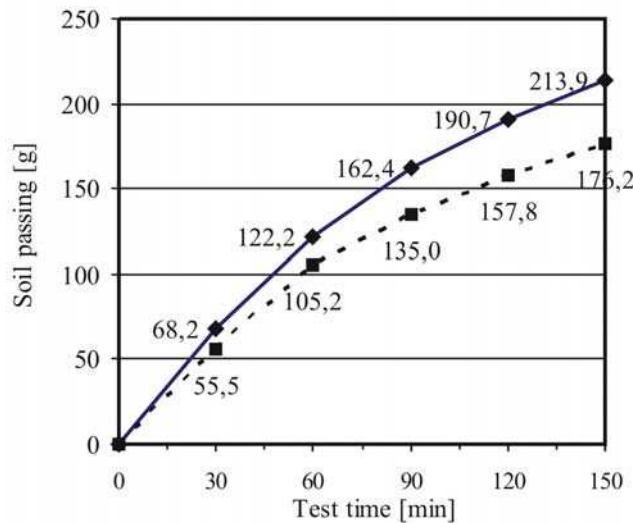


Bild 1: Bodendurchgang (soil passing) vor und nach Abriebbeanspruchung

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: 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.

2013: Es soll eine Versuchszelle für Turbulenzversuche an Proben im gedehnten Zustand konzipiert werden.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

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

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

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

Betone für massive Bauteile von Wasserbauwerken

Projekt-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 „Massive 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

Zum Erreichen der Untersuchungsziele soll folgende Vorgehensweise verfolgt werden:

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

Das Untersuchungsprogramm insgesamt wird durch ein Gremium von anerkannten Betontechnologen begleitet 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 Schleusenkammersohlen vergleichbare Expositionen aufweisen, bereits möglich. Ein Gremium anerkannter Betontechnologen zur technischen Absicherung des Vorhabens konnte gewonnen werden. Bei der Erarbeitung des Sachstandes ist eine Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen/Prof. Brameshuber vorgesehen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012-2014: Darstellung des Sachstands, Erstellung und Umsetzung des Bearbeitungskonzeptes

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 unhydratisierten Zement und an einem für 7 Tage unter genormten Bedingungen hydratisierten Zement die Lösungswärme in einer Säuremischung bestimmt wird. Aus der Differenz wird die Hydratationswärme berechnet. Während der Lagerungsdauer wird die Temperatur konstant gehalten. Die 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. Die Bewertbarkeit von mit unterschiedlichen Prüfmethode ermittelten Temperaturerhöhungen wird verbessert. Ausgangsstoffuntersuchungen zur Optimierung der Freisetzung von Hydratationswärme könnten bei Eignung der Verfahren im Vorfeld von Baumaßnahmen mit deutlich reduziertem Aufwand durchgeführt werden, um eine Optimierung der Betonzusammensetzung in Bezug auf die Hydratationswärmeentwicklung zu erreichen.

1.3 Untersuchungsziel

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

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 vier 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 eher untere Abschätzung der adiabatischen Wärmeentwicklung erfolgen kann. Weiterhin deuten die ersten Untersuchungen an, dass aus Ergebnissen isothermer Prüfverfahren berechnete Wärmeentwicklungen die adiabatische Temperaturentwicklung teilweise deutlich unterschätzen. Zur Absicherung dieser Erkenntnisse sind weitere Untersuchungsreihen geplant.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: 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 Prüfmethode und ein Ausblick auf das zukünftige Vorgehen bei Untersuchungen zur Hydratationswärmeentwicklung im Rahmen von Kontrollprüfungen bei Baumaßnahmen der WSV sowie hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten rechnerischer Verfahren zur Bestimmung der quasiadiabatischen Temperaturerhöhung. Eine Zusammenarbeit mit verschiedenen Forschungseinrichtungen soll die zukünftige Vorgehensweise absichern.

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 Zusammenarbeit mit der Hochschule Mannheim wurde eine Masterarbeit zum Thema "Untersuchungen an Acrylatgelen in Betonmodellen mit Dichtelementen" erstellt. Im Rahmen der Masterarbeit wurden die physikalischen Eigenschaften von drei handelsüblichen Acrylatgelen untersucht. Die ausgewählten Produkte wurden bereits pilotartig für die Instandsetzung bei Maßnahmen der WSV eingesetzt. Im nachfolgenden werden diese drei Gele mit A, B und C bezeichnet. Für die Instandsetzung von Dehnungsfugen in Verkehrswasserbauwerken wurden bislang nur die Gele A und C eingesetzt. Die nachfolgende Abbildung 1 zeigt die Kontaktreaktion zwischen Gel B und einem Bewehrungsstahl nach 3 Monaten Lagerung des Betonmodells. Mit Hilfe der Energiedispersionsanalyse (EDX) wurde festgestellt, dass die Fe-Ionen bis 2,3 cm Tiefe in das Gel diffundiert sind.

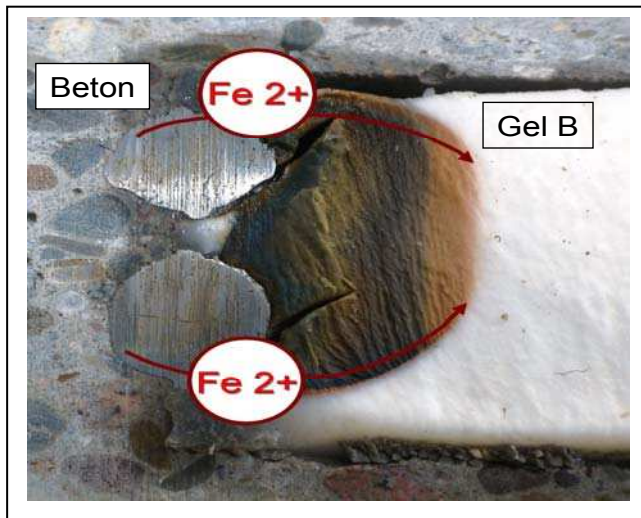


Bild 1: Bohrkerne, Gel B und Korrosionsspuren im Gel

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

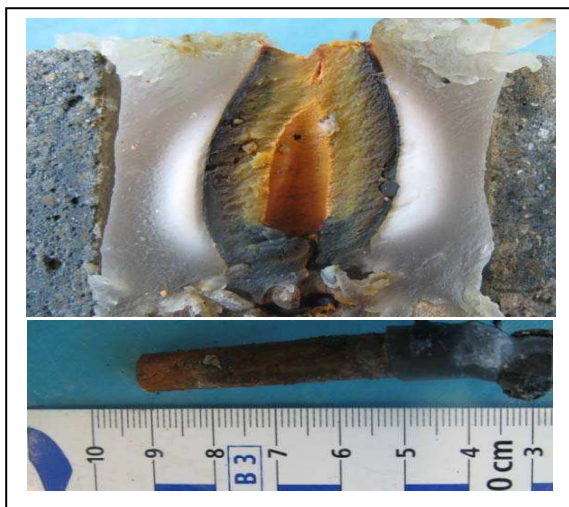


Bild 2: Lollipop-Probekörper künstliches Kiesnest Gel B (oben) und gerostete Arbeitselektrode (unten).

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

Aus der nachfolgenden Abbildung 2 ist die Temperaturentwicklung der drei Gele während der exothermen Aushärtung mit einem Volumen von 10 l zu ersehen. Im Falle der Fugeninstandsetzung bei älteren Bauwerken muss berücksichtigt werden, dass vielfach thermoplastische Dichtelemente vorhanden sind, die nicht dem heutigen Stand der Technik entsprechen. Daher ist bei den festgestellten Temperaturen eine Veränderung der Materialeigenschaften dieser Dichtelemente nicht auszuschließen.

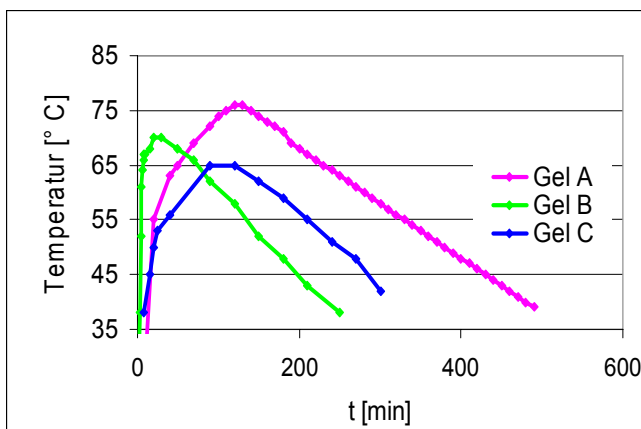


Bild 3: Temperaturentwicklung während der Aushärtung bei einem Gel-Volumen von 10 l

Mit der Bestimmung des spezifischen Widerstandes kann die Möglichkeit der Korrosion von Bewehrungsstahl bei Kontakt mit Acrylatgelen abgeschätzt werden. Hierzu wurden Kunststoffbehälter mit Gel ausgefüllt. Als Elektroden dienten Edelstahlgitter. Im Nasszustand zeigten die drei Gele eine gute Leitfähigkeit. Die Zugeigenschaften der Gele sind stark abhängig vom Wassergehalt und der Prüftemperatur. So zeigt Gel C beispielsweise bei Raumtemperatur nach 12 Tagen Trocknung an der Luft eine mittlere Bruchfestigkeit von 5,9 MPa bei einer mittleren Bruchdehnung von 6 %.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2012: Nach 1 Jahr Lagerung sollen aus den Betonmodellen erneut Bohrkern entnommen und hinsichtlich der Wechselwirkung des Acrylatgels mit Dichtelementen untersucht werden. Ferner sollen die Materialeigenschaften eines quellfähigen Vliesstoffes untersucht werden. Es soll festgestellt werden, ob der Quellvorgang des Polymers mit der Gelbildung vergleichbar ist
- 2013: 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.). Bewertung des Gefährdungspotentials der Ausgangsstoffe und der ausreagierten Stoffe in Zusammenarbeit mit der BfG.

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 schleusenkamerseitigen Wandoberfläche aufgesetzte Fugenbänder (Schleusen Uelzen 1, Leerstetten und Eibach) oder die Injektion von Bewegungsfugen mit Produkten auf der Basis von PUR und Acrylatgelen (diverse Schleusen am MDK). Die bisherigen nachträglich aufgesetzten Fugenbandkonstruktionen sind zeit- und kostenaufwendig. PUR und Acrylatgele müssen unter technischen und umweltrelevanten Aspekten kritisch hinterfragt werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

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

3 Ergebnisse

In Zusammenarbeit mit dem WSA Aschaffenburg wurde 2010 bei der Doppelschleuse Kleinostheim eine Dehnungsfuge im Längskanal und eine Fuge der Schleusenammer mit einem stahlseilbewehrten Dichtungsband (SBK) ausgerüstet. Bei der Ausbildung der Flanschkonstruktion war es von Vorteil, dass im Bereich der Richtungsänderung Sohle/Kammerwand auf die Flanschkonstruktion verzichtet werden kann. Für die dauerhafte Klemmung des SBK wurden Tellerfedern eingesetzt. Diese Konstruktionsanordnung wurde zuvor im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht. Die ersten Beobachtungen zeigen, dass diese Instandsetzungsvariante eine Ertüchtigungsalternative für Fugen mit Richtungsänderungen in der Abdichtungsebene darstellt. Für die Abdichtung des Längskanals war es entscheidend, dass die Abdichtungsebene endlos hergestellt werden konnte.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2012: Untersuchung der Fugeninstandsetzungs-Variante "Überbohren der Fugen" mit einem modifizierten SBK an einer Fuge im Modell in Zusammenarbeit mit einer Fachfirma zur Untersuchung der Einsatzgrenzen.
- 2013: Durchführung eines Pilotprojektes zu der Variante "Überbohren der Fugen", mit einer Bohrfirma bei der hinter der bisherigen Abdichtungsebene der Fugenspalt überbohrt wird und die Bohrung bis auf die Höhe des Unterwassers der Schleuse läuft. In die Bohrung wird ein modifiziertes SBK einbetoniert. Im Bereich der Sohle wird das SBK geklemmt. Weitere Erarbeitung von Ertüchtigungslösungen für schadhafte Bewegungsfugen in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen (u. a. Fugenweitenänderung, Zugänglichkeit, dauernde oder temporäre Wasserbeaufschlagung, Umweltaspekte, Wasserdruck und Temperatur).

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 und Unterhaltung 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.

Die Restnutzungsdauer von gemauerten Wasserbauwerken kann erheblich verlängert werden, wenn eine sachkundige Unterhaltung betrieben wird. Die Grundsätze einer sachkundigen Unterhaltung helfen die Gebrauchstauglichkeit zu erhalten und notwendige Instandsetzungen hinaus zu zögern.

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.

Für die Unterhaltung sollen notwendige Arbeiten und in der Vergangenheit erfolgreich angewendete Methoden aufgezeigt 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 und weiteres Vorgehen

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 Unterhaltung durch geschulte Facharbeiter bedürfen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Sachstandsstudie ist fertig. Der Schlussbericht ist für Mitte 2012 geplant.



Bild 1: Oberhaupt-Notverschlussnische mit gerissenem Mauerwerk



Bild 2: Unterhaupt mit wasserdurchlässigen Fugen, Materialverlust durch Abwitterung und schadhafter Kantensteinenkonstruktion

Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung

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, Schleusenkamerwände). Ein Verschleiß der Betonoberflächen erfolgt insbesondere durch die im Wasser mitgeführten Feststoffe, die eine kombinierte schleifende und stoßende Beanspruchung auf die Betonoberflächen ausüben können. Der Grad der Beanspruchung wird unter anderem durch die Fließgeschwindigkeit des Wassers und durch Anteil, Härte, Form und Größe der Feststoffe im Wasser beeinflusst. Auf europäischer Ebene wird der Verschleißwiderstand im Regelwerk der EN 206-1 nicht gesondert behandelt. Im nationalen Anwendungsdokument der DIN 1045-2 wird zur Beschreibung der Intensität der mechanischen Verschleißbeanspruchung eine Expositionsklasseneinteilung XM1 bis XM3 vorgenommen. Diese wurde bei der Erarbeitung der ZTV-W LB 215 bzw. 219 übernommen. Tabelle 1 enthält einen Auszug der ZTV-W LB 215 mit wasserbauspezifischen Beispielen, bei denen eine unterschiedliche Intensität der mechanischen Beanspruchung vorherrschen kann.

Tabelle 1: Expositionsklassen zur mechanischen Verschleißbeanspruchung von Beton mit wasserbauspezifischen Beispielen (ZTV-W LB 215, 2004)

| Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung | | |
|--|-------------------------------------|---|
| Klasse | Beschreibung | Wasserbauspezifische Beispiele |
| XM1 | mäßige Verschleißbeanspruchung | Flächen mit Beanspruchung durch Schiffsreibung (z. B. Schleusenkamerwände 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 ungewiss. Die Beschreibung der Geschiebefracht und der Strömungsgeschwindigkeit anhand der Beispiele in Spalte 3 lassen Interpretationsspielraum offen. Eine Überprüfung und ggf. Anpassung der Regelungen wäre daher erforderlich.

Auch auf der Widerstandsseite, die durch den Beton beschrieben wird, sind noch viele Fragen offen, beispielsweise 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 [Jacobs, F. et al, 2001], [Helbig, U.; Horlacher, H.-B., 2007], [Vogel, M.; Müller, H. S., 1998]. Der Betonwiderstand hängt auch von der Härte, Größe und Zusammensetzung der Gesteinskörnung, des Verbundes zwischen Korn und Zementsteinmatrix sowie von der Beschaffenheit der Matrix ab [Ja-

cobs, F. et al, 2001], [Haroske, G., 1998]. Ebenfalls werden Untersuchungen zu positiven Effekten durch Zugabe von Stahlfasern, Polypropylenfasern oder Gummigranulat beschrieben [Kryzanowski, A. et al, 2005].

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

- a) Erarbeitung einer Klassifizierung analog zur Expositionsklassensystematik für die Hydroabrasionsbeanspruchung in Zusammenarbeit mit der TU Dresden.
 - Berücksichtigung vorliegender Erfahrungen der WSV
 - Durchführung von Messungen an Bauwerken
 - Definition von Abrasionsregimen für bestimmte Bauteilgruppen
 - Ableitung von Hydroabrasionklassen
- b) Bewertung von Performance-Prüfverfahren hinsichtlich deren Eignung zur Beurteilung wasserbau-relevanter Schädigungsmechanismen durch Hydroabrasion
- c) Erarbeitung von Anforderungen an Betonausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen zur Sicherstellung eines hinreichenden Widerstandes gegenüber Hydroabrasion

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

Die Erarbeitung von Schritt a) erfolgt derzeit mit einem Vorlauf zu den Schritten b) und c) in Zusammenarbeit mit der TU Dresden, Institut für Wasserbau. Erste hydroabrasionsbedingte Schäden an Bauwerken der WSV wurden in die Betrachtungen aufgenommen.

Bei Schritt b) sollen die Verfahren nach [ASTM, 2010], die Verschleißtrommel auf Grundlage von Bania [Bania, A., 1989] in der Modifikation von Vogel [Vogel, M.; Müller, H. S., 1998] sowie eine Plattenabrasionstrommel in Anlehnung an das Prüfgerät zur Bestimmung der Abriebbeständigkeit von Geotextilien nach RPG [RPG, 1994] Berücksichtigung finden. Erste Vorversuche wurden mit den Prüfeinrichtungen vorgenommen (Bild 1). Eine weitere Zusammenarbeit insbesondere zu Schritt c) ist mit dem Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Baustofftechnologie, vorgesehen.



Bild 1: Links: Verschleißtrommel nach [Bania, A., 1989] und [Vogel, M., Müller, H.S., 2009], mittig: Plattenabrasionstrommel, rechts: Prüfeinrichtung nach [ASTM, (2010)].

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Ermittlung der Beanspruchung infolge Hydroabrasion für unterschiedliche Bereiche wasserbaulicher Anlagen aus Beton, Erarbeitung eines Versuchsprogramms für die systematische Untersuchung des Hydroabrasionsverschleißes, Durchführung der systematischen Untersuchungen, Bewertung der Untersuchungen, Ableitung von Hydroabrasionsklassen analog zur Expositionsclassensystematik und Festlegung von Anforderungen an Betone

2013: Abschluss der Untersuchungen und Abschlussbericht

5 Literatur

- 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
- Helbig, U.; Horlacher, H.-B.: Ein Approximationsverfahren zur rechnerischen Bestimmung des Hydroabrasionsverschleißes an überströmten Betonoberflächen. In: Bautechnik 84, Nr. 12, S. 854-861, 2007
- 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
- Haroske, G.: Beitrag zum Hydroabrasionsverschleiß von Betonoberflächen. Dissertation Universität Rostock, 1998
- 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
- Bania, A.: Bestimmung des Abriebs und der Erosion von Betonen mittels eines Gesteinstoff-Wassergemisches. Dissertation Technische Hochschule Wismar, 1989
- ASTM, Standard Test Method for Abrasion resistance of Concrete (Underwater Method) – ASTM C 1138M-05 (Reapproved 2010), 2010
- Helbig, U.; Horlacher, H.-B. (2007): Ein Ansatz zur versuchstechnischen Simulation und Übertragbarkeit der Hydroabrasion strömungsbeanspruchter Betonoberflächen im Wasserbau. In: Bautechnik 84, Nr. 9, S. 641-645, 2007
- Richtlinien für die Prüfung von Geotextilien im Verkehrswasserbau (RPG). Bundesanstalt für Wasserbau, 1994

Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen

Netzplan-Nr.: A39510370009

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

E-Mail: thorsten.reschke@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

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

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

3 Ergebnisse

Im Berichtsjahr 2011 wurden alle Ausgangsmaterialien beschafft. Insgesamt wurden 4 Gesteinskörnungen aus dem mitteldeutschen Raum in die Untersuchungen einbezogen. Nach den üblichen Stoffprüfungen und einer petrografischen Zuordnung wurden für jede der Gesteinskörnungen folgende Untersuchungen zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit durchgeführt bzw. begonnen:

- (a) Prismenschnelltest gemäß Alkali-Richtlinie
- (b) kombinierter Schnelltest BTU-SP
- (c) Betonprüfungen gemäß Alkali-Richtlinie
- (d) Performance-Prüfungen an Betonen.

Bei den Schnellprüfverfahren (a) und (b) zeigten alle bislang untersuchten Gesteinskörnungen eine deutliche Alkaliempfindlichkeit. Das folgende Diagramm zeigt die Dehnung von Prismen während des Prismenschnelltests (a). Der Grenzwert der Dehnung von 1,0 mm/m wird bei allen 4 Gesteinskörnungen (GK) überschritten. Ein systematischer Einfluss der Prüfkorngröße (2/8 oder 8/16 mm) ist nicht erkennbar.

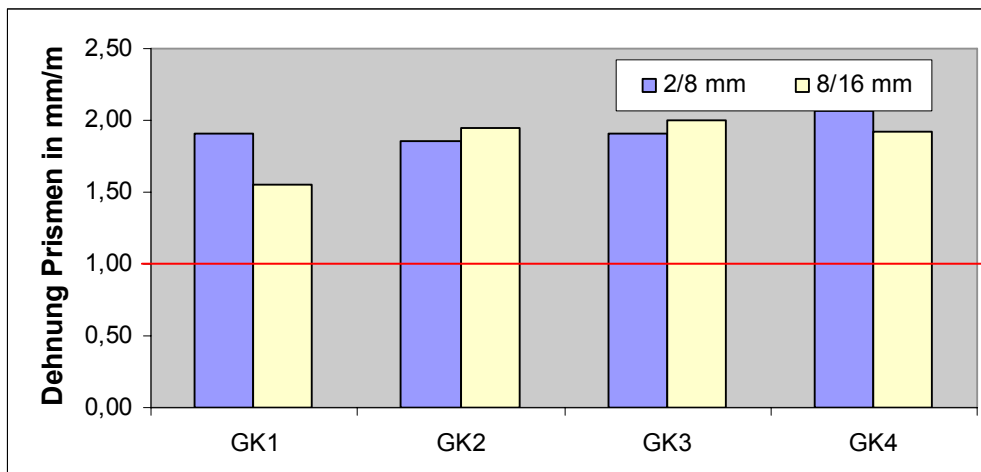


Bild 1: Dehnung von Prismen im Schnelltest (a) nach 14 Tagen Lagerung in NaOH bei 80°C

Eine vergleichbare Bewertung ergibt sich auch aus dem Schnelltest (b) gemäß BTU-SP-Verfahren. Bei den 3 bislang untersuchten Gesteinskörnungen überschreitet der Bewertungskennwert SP_{AKR} für alle Prüfkorngrößen den Grenzwert von Null sehr deutlich. Hier scheint die größere Prüfkorngröße 8/16 mm zudem etwas empfindlicher zu reagieren.

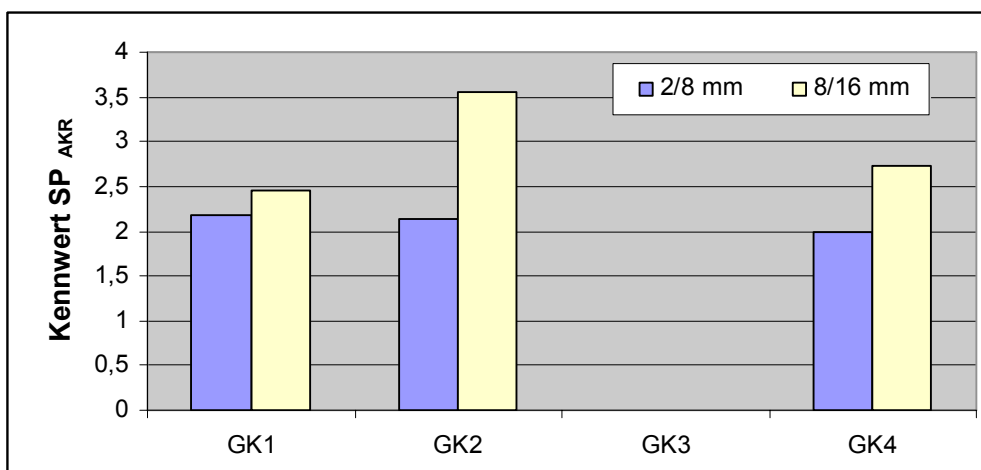


Bild 2: Ergebnisse Löslichkeits-Porositätstest BTU-SP (b)

Für den Betonversuch (c) wurden mit allen 4 Gesteinskörnungen Betone mit einem speziellen Prüfzement mit erhöhtem Alkaligehalt (Na_2O -Äquivalent Zement 1,3 M.-%) sowie vergleichend mit einem NA-Zement hergestellt und in einer Nebelkammer bei 40°C und gesättigter Luftfeuchte eingelagert. Die Lagerungsdauer beträgt 9 Monate. Während der Lagerung wird die Dehnung gemessen und innere sowie äußere Gefügeschäden (Risse) erfasst.

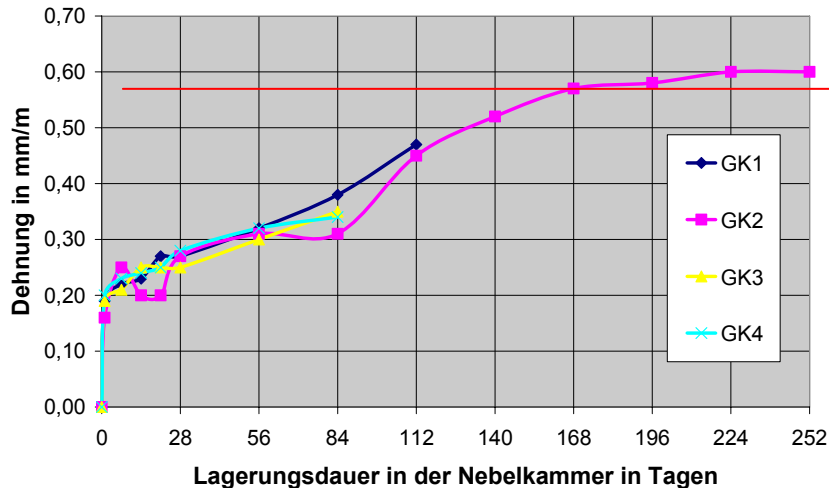


Bild 3: Betonversuch (c) in der 40°C -Nebelkammer für die 4 Betone mit erhöhtem Alkaligehalt

Bei dem Beton mit der Gesteinskörnung GK2 wurde der als kritisch anzusehende Dehnungswert von $0,6 \text{ mm/m}$ nach rd. 8 Monaten knapp erreicht, sowie feine Risse an den Proben festgestellt. Damit wurde zwar eine gewisse Alkaliempfindlichkeit bestätigt, eine eindeutige Bewertung allein mit dieser Prüfung ist aber nicht gegeben. Bei den anderen 3 Gesteinskörnungen mit späterem Prüfbeginn zeichnet sich bislang ebenfalls ein schwacher Anstieg der Dehnung ab.

Ergänzend zum vorgenannten Betonversuch werden mit den gleichen Gesteinskörnungen Performance-Prüfungen (d) in einer speziellen Prüfvorrichtung der Bauhaus-UNI Weimar durchgeführt. Diese Prüfungen sollen eine eindeutigere Bewertung unter praxisnaher Beanspruchung ermöglichen. Zunächst waren folgende Betone mit Zusammensetzungen aus aktuellen Bauvorhaben der WSV herzustellen:

Tabelle 1: Betonzusammensetzungen für Performance-Prüfungen (d)

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

Mit den Betonen wurden die Performance-Prüfungen für je 2 Varianten (mit und ohne Salzbelastung) begonnen. Jeder Lagerungszyklus umfasst neben einer Trocken- und Feucht-Warm-Lagerung auch mehrere Frost-Tau-Wechsel und dauert 3 Wochen. Eine Bewertung kann erst nach 8 Zyklen erfolgen, d.h. einer Lagerungsdauer von jeweils rd. 6 Monaten.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Abschluss der Nebelkammerversuche und Performance-Prüfungen am Beton sowie verifizierende Anschlussuntersuchungen (u.a. Dünnschliffmikroskopie).

2013: Auswertung der Versuchsergebnisse und Abschlussbericht.

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 Feldversuchen abzuleiten, Stoffgesetze an wasserbautypische Bedingungen anzupassen und in FE-Programme einzubauen.

2 Untersuchungsmethoden

Für die Schleuse Eibach, die aufgrund von Standsicherheitsdefiziten saniert werden musste, wurden die Verformungsprognosen mithilfe des klassischen Hardening-Soil-Modells (*HS-Modell*) und mit dem Hardening-Soil-Modell mit Berücksichtigung großer Steifigkeiten bei kleinen Dehnungen (*HS-small-Modell*) verglichen. Die Stoffparameter wurden anhand von Feld- und Laborversuchen ermittelt. Bild 1 zeigt die Nachrechnung von Oedometerversuchen mit den beiden Stoffmodellen für die Auffüllung der alten geböschten Baugrube.

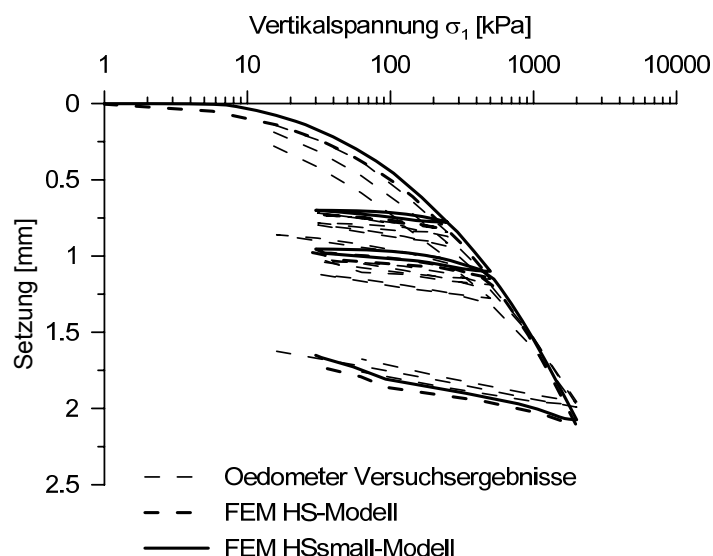


Bild 1: Simulation von Oedometerversuchen mit verschiedenen Stoffmodellen

Für HS-small sind zwei zusätzliche Parameter erforderlich, die eine größere Steifigkeit bei kleinen Dehnungen bewirken. Die maßgebende Schubsteifigkeit G_0 , wurde anhand von geophysikalischen Feldversuchen (Oberflächenwellenseismik) über $E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu_{ur})$ bestimmt (s. Bild 2). Der zweite Parameter $\gamma_{0,7}$, der den Bereich definiert, für den die höhere Steifigkeit gilt, wurde anhand von Literaturangaben gewählt [Benz, T. et al, 2009].

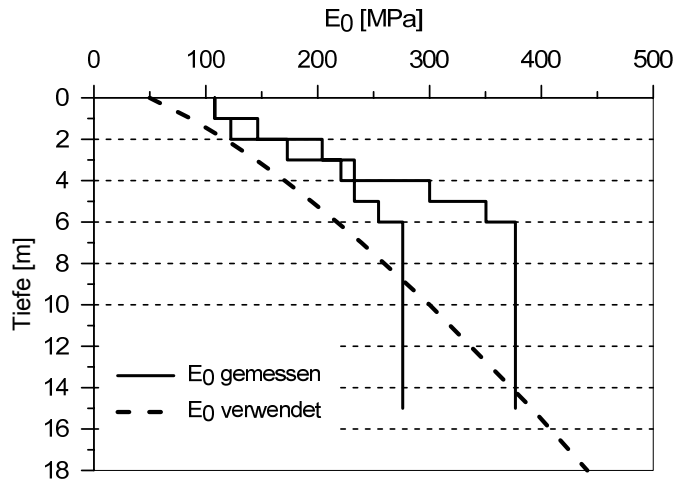


Bild 2: Gemessene und verwendete dynamische Steifigkeit der Auffüllung über die Tiefe

3 Ergebnisse

Es wurden die horizontalen Verschiebungen der Kammerwände bei einem Schleusungsvorgang gemessen und mit den Ergebnissen der Finite-Elemente-Berechnung verglichen. Für das HS-Modell ergeben sich bei der linken Schleusenkammerwand 12 mm, die deutlich über den gemessenen Werten von 4 mm liegen. Hier ergab sich mit dem HS-small-Modell mit 7 mm ein realistischeres Ergebnis. Die Kopfverschiebungen der rechten Kammerwand sind vom Baugrund vergleichsweise unabhängig und konnten mit beiden Stoffgesetzen mit jeweils 14 mm gegenüber gemessenen 12 mm gut abgebildet werden.

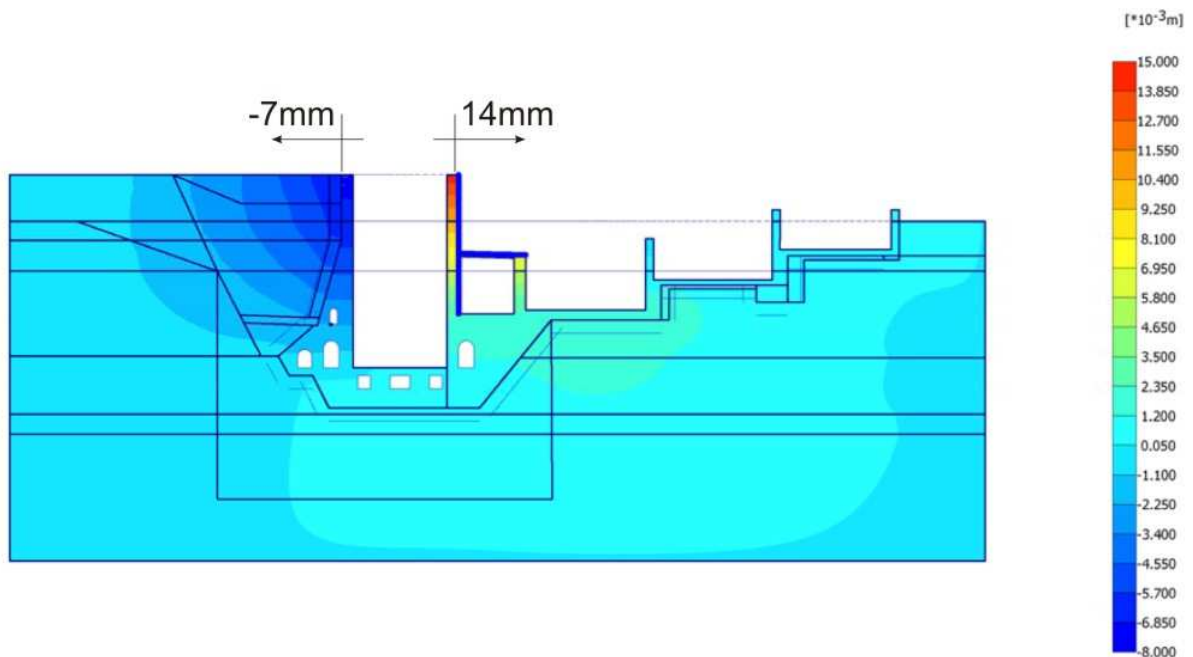


Bild 3: Theoretische und gemessene Erddruckbeiwerte

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Der geplante Bericht zu den Ergebnissen aus dem Bau der Schleuse Süfeld konnte mangels Personalkapazitäten nicht erstellt werden und ist nun für 2012 zusammen mit dem Abschluss des Forschungsvorhabens geplant.

5 Literatur

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

6 Veröffentlichungen

Stelzer, O., Kauther, R. (2011): Relevance of small-strain stiffness in the deformation analysis of navigable locks, International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials, September 1-3, Seoul, Korea

Bruch- und Verformungsverhalten von rutschgefährdeten Böschungen unter Berücksichtigung des Dreiphasensystems

Netzplan-Nr.: A39520210001

Projektleiter: Dipl.-Ing. R. Schulze, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

E-Mail: roland.schulze@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Zur Beurteilung von rutschgefährdeten Böschungen ist die Kenntnis der effektiven Spannungen im Bereich der Scherzone von großer Bedeutung. Hierzu ist eine zutreffende Einschätzung des herrschenden Porenwasserdruckes erforderlich. Die Porenwasserdruckverhältnisse können zeitlich und räumlich stark veränderlich sein. Dies gilt insbesondere in bindigen Böden, die hydraulisch nur gering durchlässig sind.

Als Auslöser von Böschungsrutschungen gilt (auch in bindigen Böden) häufig ein Anstieg der Sickerlinie. In der bisherigen Praxis wurden Messungen fast ausschließlich in offenen Grundwasserbeobachtungsrohren durchgeführt. Da infolge der geringen Durchlässigkeit des Bodens eine hinreichende Wasserspiegeländerung im Messrohr, wenn überhaupt, nur zeitlich extrem verzögert erfolgen kann, ist dieses Verfahren zur Ermittlung der Wasserdruckverhältnisse in gering durchlässigen Böden ungeeignet. Die Verwendung von Porenwasserdrucksensoren, die in geeigneter Weise im Boden eingebaut werden, ist deshalb zur Erfassung der maßgebenden hydraulischen Verhältnisse im bindigen Boden unbedingt erforderlich.

Als theoretischer Unterbau wird das Dreiphasenmodell (bestehend aus Feststoff, Wasser und Gas) angewendet. 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. Auch nach einer zukünftigen Kanalvertiefung wird die Standsicherheit größer sein als im ursprünglichen Zustand. Durch den Einbau von Druckentlastungsbohrungen konnte bereichsweise eine aufwändige Abflachung der Böschung vermieden werden.

Auch im Jahr 2011 wurde die Porenwasserdruckentwicklung weiter beobachtet. Das Messprogramm wird fortgesetzt bis ein quasi stationärer Endzustand erreicht ist bzw. saisonale oder ggf. langfristig wirkende Einflüsse (wie z. B. verminderte hydraulische Wirksamkeit der Dränrohre) erfasst werden. Die bisher gewonnenen Erkenntnisse wurden im Rahmen der Ausbauplanung SKH in konkrete Empfehlungen zur Sanierung von gefährdeten Böschungen bei SKH-km 3 umgesetzt.

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 für diese Eignungsprüfung bereits im Jahr 2009 entsprechende Porenwasserdrucksensoren am SKH installiert. Bislang vorliegende Messwerte zeigen jedoch, dass im Bereich, der am SKH für die Eignungsprüfung vorgesehen war, relativ geringe Porenwasserdrücke herrschen und somit dieser Bereich als kaum geeignet erscheint, um die Wirksamkeit von Druckentlastungsbohrungen nachzuweisen. Deshalb wird dort der Einbau der Druckentlastungsbohrungen vorerst auf unbestimmte Zeit verschoben.

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, die im Probestollen seit 2005 durchgeführt wurden, soll die Ausbreitung von Porenwasserdruckänderungen in einem relativ homogenen und sehr gering durchlässigen Bodenmaterial messtechnisch erfasst werden. Im Laufe der Jahre zeigte sich, dass Auswirkungen im Zusammenhang mit der Herstellung des Probestollens die Porenwasserdruckentwicklung maßgebend beeinflussen. Diese Effekte wurden dokumentiert (Bild 1), Einzelheiten sind einem Aufsatz zu entnehmen, der anlässlich der internationalen Messtechnik-Konferenz FMGM 2011 veröffentlicht wurde. Darin werden u. a. Schlussfolgerungen gezogen, die neue Perspektiven zum Bruch- und Verformungsverhalten von Tonböschungen eröffnen und Anwendungsgrenzen der in Abschnitt 1.1 genannten Kontinuumsmodelle überschreiten.

Bedauerlicherweise wurde das Tonbergwerk Klingenberg Ende 2011 nach entsprechender Ankündigung geschlossen. Die letzten Messungen wurden planmäßig am 13. Dezember 2011 durchgeführt.

Danach wurde der Probestollen – zusammen mit dem Stollensystem des gesamten Bergwerks – endgültig versiegelt und ist somit dauerhaft unzugänglich.

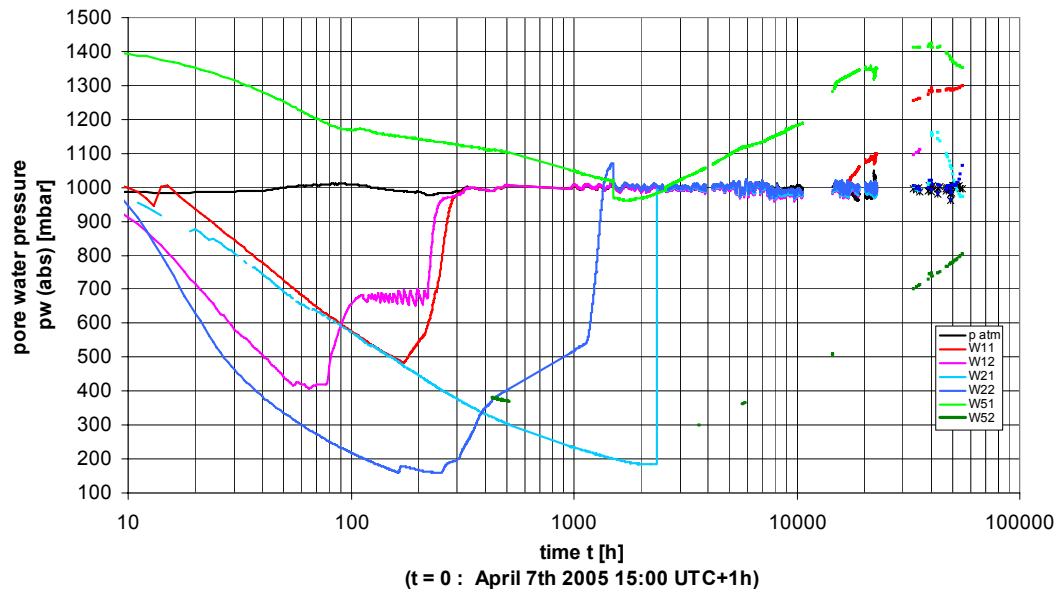


Bild 1: Porenwasserdruckentwicklung in der Messstrecke Tonbergwerk Klingenberg/Main

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Herstellung der von Fa. Ischebeck für 2010 vorgesehenen Druckentlastungsbohrungen konnte nicht, wie ursprünglich vorgesehen, durchgeführt werden, weil die im Probefeld herrschenden Porenwasserdrücke nicht in den Erwartungen entsprachen, d. h. nicht hinreichend groß sind. Da damit die wesentliche Voraussetzung für eine Eignungsprüfung der Druckentlastungsbohrungen nicht gegeben ist kann die Eignungsprüfung nicht wie vorgesehen durchgeführt werden und wird deshalb auf unbestimmte Zeit verschoben.

Für das Jahr 2012 ist eine schriftliche Zusammenfassung der Ergebnisse vorgesehen.

Die im o. g. Konferenzbeitrag veröffentlichten Beobachtungen zu plötzlichen Veränderungen der Materialeigenschaften des Tongebirges, könnten auch zur Abschätzung der zeitabhängigen Standsicherheit von Einschnittböschungen in überkonsolidiertem Ton verwendet werden. Damit eröffnen sich völlig neue Perspektiven, die Gegenstand eines nachfolgenden Forschungsprojekts sein sollten, das noch formuliert werden muss.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

- 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, p. 295-312, ISBN 978-3-900484-52-1
- Schulze R. (2010): Beitrag zum BAW-Kolloquium FuE im Binnenverkehrswasserbau am 03. März 2010 in Karlsruhe
- Schulze R. (2011): Pore water pressure effects in clay due to unloading – long-term measurements, change of soil fabric and application, Proc. 8th International Symposium on Field Measurements in GeoMechanics (FMGM), 2011, Berlin

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 größtmöglichen 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 Böschungen 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 Schiffparameter 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 Anfahrtschwindigkeit 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 Δx
- 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 Δz_s mit Hilfe der Bedingung, dass die vertikale Auflagerkraft nicht größer als die vertikale Komponente des Erdwiderstandes 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).

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

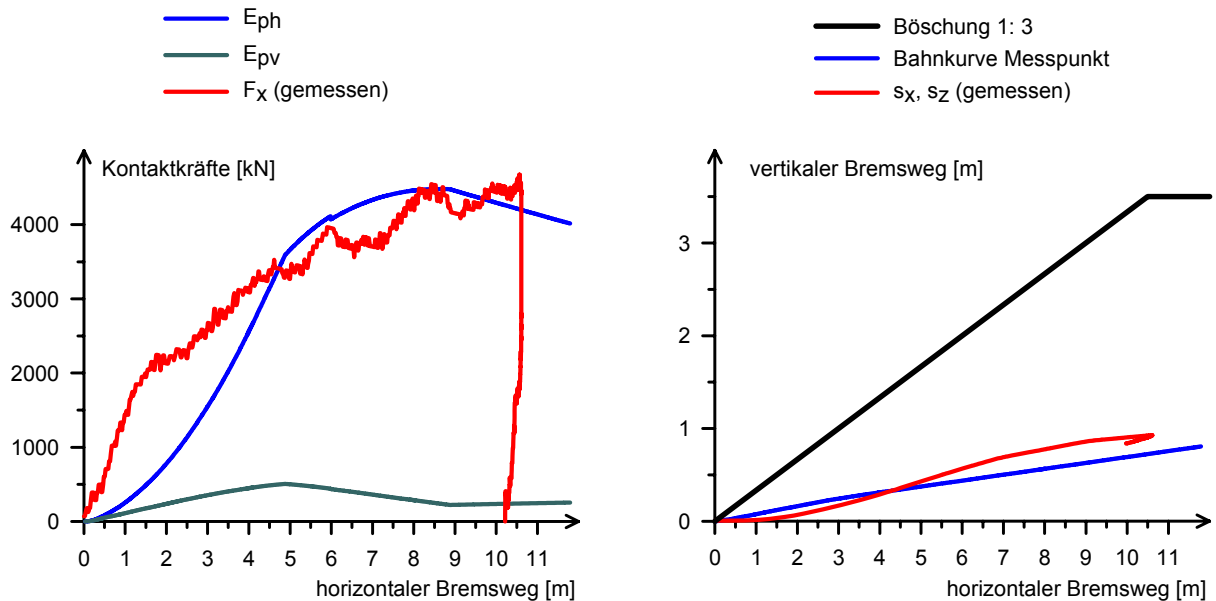


Bild 1: Berechnete und gemessene Kontaktkräfte (links) sowie berechneter und gemessener Bremsweg im Vergleich (rechts)

Mit dem Ziel der Optimierung des Berechnungsverfahrens für das Spitzbugschiff wird derzeit der Einfluss einer zusätzlich wirksamen Reibungskraft an der Bugwand und an der Schiffssohle untersucht. 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

Aufgrund der Betreuung von Bauprojekten, die sich derzeit in der Ausführung befinden und fehlender Personalkapazitäten konnten die Untersuchungen im Jahr 2011 nicht fortgesetzt werden. Für das Jahr 2012 sind weitere Vergleichsberechnungen und eine Evaluierung der vorhandenen Berechnungsverfahren geplant. Das Forschungsvorhaben soll 2013 abgeschlossen werden.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

Kauther, R., Schuppener, B.: Ship collision with waterway embankments - a proposal for the calculation of the stopping distance and the contact forces, 11th Baltic Sea Geotechnical Conference, September 2008, Danzig

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.

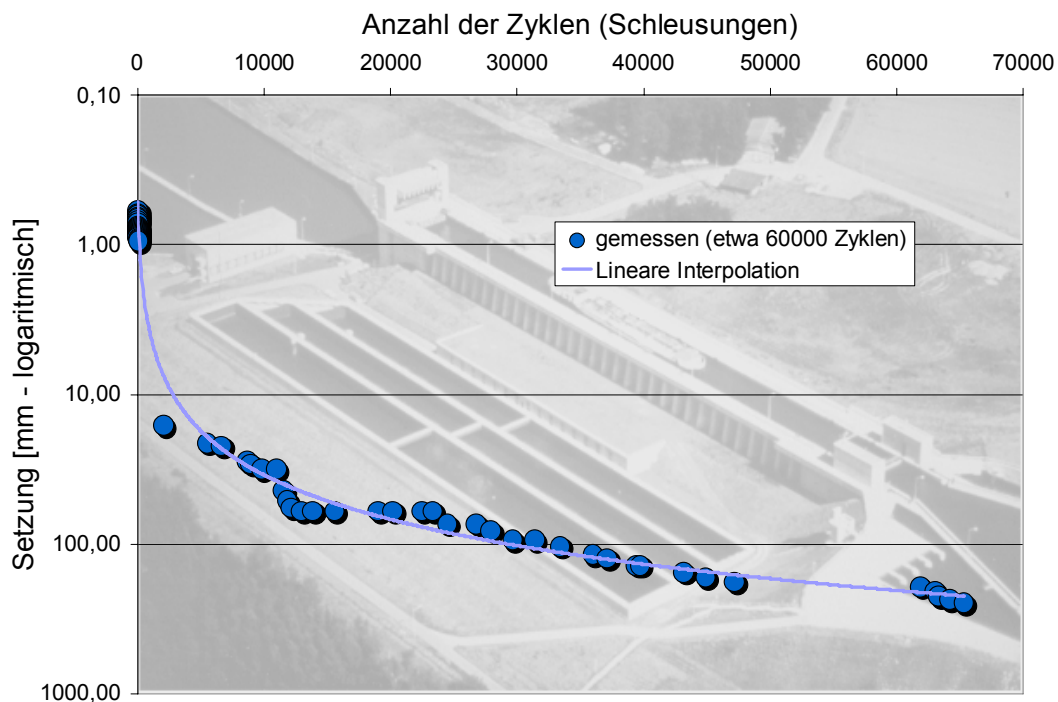


Bild 1: Setzungen der Schleuse Uelzen I als Funktion der Lastzyklen (= Schleusungen)

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).

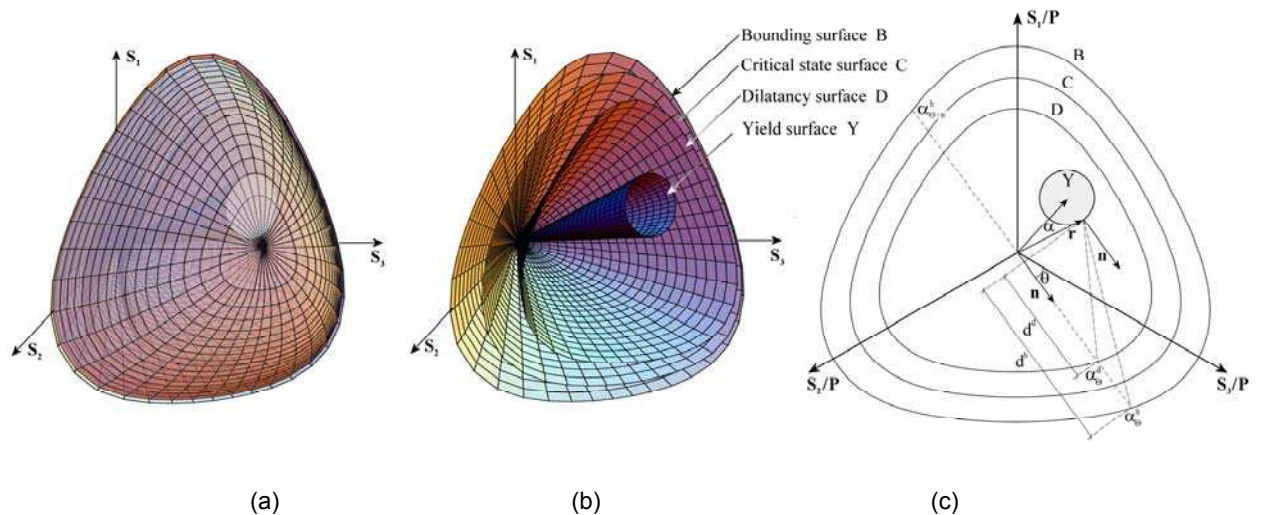


Bild 2: Das verwendete Bounding-Surface Modell im Hauptspannungsraum dargestellt:
 (a) Kappe – nur der hervorgehobene Bereich der Kappe ist aktiv;
 (b) Grenzflächen des Modells; (c) Projektionsregeln.

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.

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 2012 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

-/-

6 Veröffentlichungen

- 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.
- Benz, T. (2007a): Small-Strain Stiffness and its Numerical Consequences. Dissertation, Institut für Geotechnik. Universität Stuttgart, 2007.
- Benz, T.; Vermeer, PA. (2007b): Zur Berücksichtigung nichtlinearer Bodensteifigkeit im Bereich kleiner Dehnungen in geotechnischen Berechnungen. Bautechnik 11, 2007, pp. 749 - 761.
- 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.
- Benz, T, Schwab, R, Vermeer, PA. (2009): Small-strain stiffness in geotechnical analyses. Bautechnik 86(S1), pp. 16 - 27.

Numerische Modellierung von Bruchvorgängen in Böden

Projekt-Nr.: A39520210084

Projektleiter: Dipl.-Ing. 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 τ_{\max} fällt diese bei zunehmenden Verformungen bis zur Restscherfestigkeit τ_r ab (Bild 1).

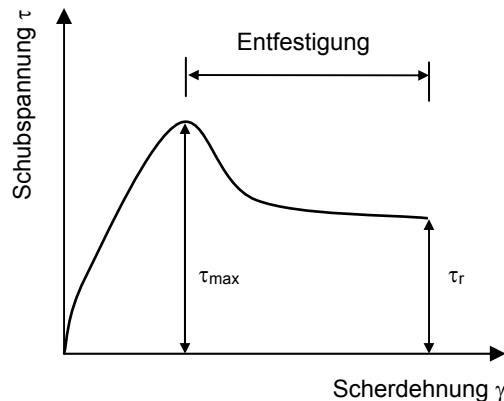


Bild 1: Schubspannungs-Scherdehnungs-Diagramm mit Entfestigungsverhalten

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 Ω^- und gleich 1 im Teilkörper Ω^+ (vgl. Bild 2). Der Verschiebungssprung \mathbf{u}_S zwischen den durch die Scherfuge getrennten Teilkörpern wird durch zusätzlich ins Berechnungsmodell eingeführte Freiheitsgrade beschrieben.

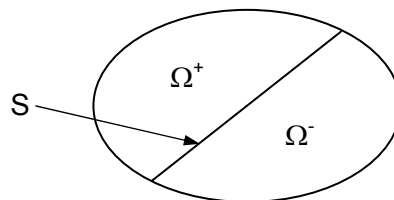


Bild 2: Schematische Darstellung eines durch die Diskontinuität S getrennten Körpers Ω

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).

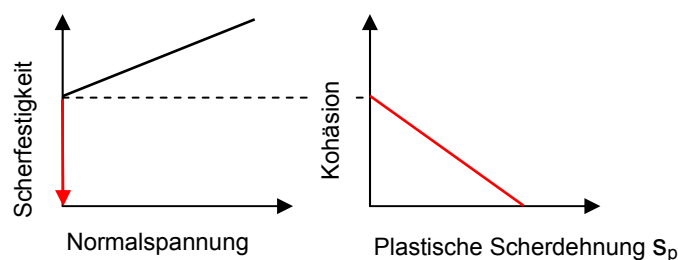


Bild 3: Mohr-Coulombsche Bruchgerade mit linearer Kohäsionsentfestigung

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.

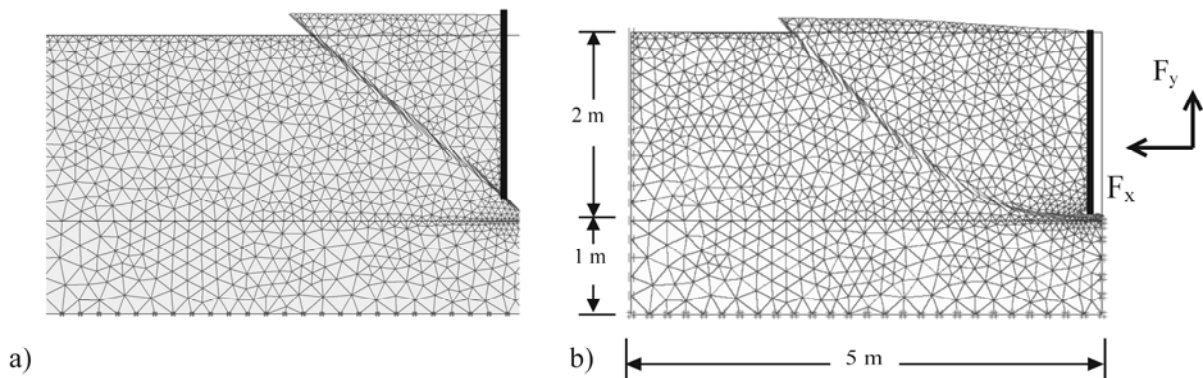


Bild 4: Berechnete Versagensmechanismen für die a) glatte und b) raue passive Wand

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 raue Wand eine gekrümmte Scherfuge aus, was auch mit theoretischen Lösungen dieses Problems korrespondiert.

Im Jahr 2011 konnte das Projekt seitens der BAW aufgrund anderer Tätigkeitsschwerpunkte nicht weiter bearbeitet werden. Von Plaxis b.v. wurde 2010 zusammen mit der TU Delft die bestehende Implementierung der Methode hinsichtlich Struktur, Robustheit und Dokumentation überarbeitet. Die Funktionstüchtigkeit wurde an einfachen Beispielen (Biaxialtest, aktive und passive Wand ohne und mit Wandreibung, Fundament nahe vertikaler Böschung) überprüft. Auf dieser Grundlage können nun weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden. Die Anwendung des entwickelten Verfahrens für praktische geotechnische Problemstellungen mit komplizierten Randbedingungen ist bisher nur eingeschränkt möglich. Es besteht noch weiterer Forschungsbedarf zur Entstehung und Ausbreitung der Scherfuge, zum verwendeten Stoffgesetz in der Scherfuge und zur Berücksichtigung des Grundwassers (z.B. bei der Berechnung einer progressiven Fortpflanzung der Scherfuge in Böschungen aus bindigen Böden). Daher ist die Mitarbeit der BAW an einem auf den vorliegenden Ergebnissen aufbauenden Projekt in Kooperation mit verschiedenen Forschungspartnern geplant.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Projekt ist abgeschlossen. Es liegen mehrere Veröffentlichungen, Zwischenberichte und ein Abschlussbericht der externen Forschungspartner vor. Ein BAW-Abschlussbericht wird noch erstellt.

Wechselbelastungen an Kleinverpresspfählen

Netzplan-Nr.: A39520270001

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

E-Mail: eva.dornecker@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

Die Größe des Tragfähigkeitsverlustes hängt von der Größe der Lastspanne im Verhältnis zur äußeren Tragfähigkeit des Pfahles und von der zu erwartenden Anzahl der Lastzyklen über die Lebensdauer des Bauwerkes ab.

Liegt der Anteil der Lastspanne der Schwell- und/oder Wechsellast unter 20 % der charakteristischen Pfahltragfähigkeit im Grenzzustand 2 (Gebrauchstauglichkeit / $R_{2,k} = R_{2,d}$ siehe DIN 1054:2005-01 8.6.1), muss nach DIN 1054:2005-01 8.4.6 (1) bzw. EAP 5.9.2 (1) keine Abminderung der Pfahltragfähigkeit vorgenommen werden. Liegt der Anteil der Schwell- und/oder Wechsellast über 20 % der charakteristischen Pfahltragfähigkeit, kann die Tragfähigkeit deutlich abfallen. Für Kleinverpresspfähle in mindestens mitteldicht gelagerten rolligen Böden über dem Grundwasserspiegel kann nach DIN 1054:2005-01 Anhang D bzw. EAP Abschnitt 5.9.2 (7) der zulässige Anteil der Lastspanne (Änderung zwischen größter und kleinster Last) in Abhängigkeit von der Anzahl der Lastzyklen abgeschätzt werden. Für rollige Böden unter dem Grundwasserspiegel und für bindige Böden sind keine empirischen Erkenntnisse vorhanden. Für die Dimensionierung von Kleinverpresspfählen in diesen Böden müssen zyklische Probelastungen mit einer großen Anzahl von Lastzyklen durchgeführt werden. Der hierfür erforderliche Aufwand liegt maßgeblich über dem Aufwand für statische Probelastungen von Kleinverpresspfählen. In der Regel ist es aus wirtschaftlichen Gründen nicht möglich die wirklich über die Lebenszeit des Bauwerkes auftretende Anzahl von Lastzyklen in der Probelastung zu simulieren. Es müssen daher aus einer beschränkten Anzahl von Lastzyklen Prognosen für das dauerhaft Verhalten des Pfahles erarbeitet werden.

Aus den bisherigen Untersuchungen gibt es Hinweise darauf, dass sich das Tragverhalten der Pfähle maßgeblich ändern kann, wenn statt Schwelllasten echte Wechsellasten auftreten. Hier traten in einigen Fällen schlagartige, nahezu vollständige Tragfähigkeitsverluste auf. Dieses Verhalten macht eine zuverlässige Prognose für die Tragfähigkeit eines Pfahles auf Grund einer beschränkten Anzahl von Lastzyklen bei einer Probelastung nahezu unmöglich. Es gibt Hinweise, dass dieses Verhalten auf rollige Böden beschränkt ist. Für bindige Böden liegen jedoch kaum Untersuchungsergebnisse vor.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

Selbst nach der Durchführung von zyklischen Probelastungen bleiben Unsicherheiten über das dauerhafte Tragverhalten der Kleinverpresspfähle bestehen. Aufgrund der vorhandenen Unsicherheiten sollten Bauwerke mit zyklisch belasteten Pfählen dauerhaft bezüglich etwaiger Lageveränderungen beobachtet werden. Dies gilt auch für Pfähle, die nach Tabelle D.2 der DIN 1054 bemessen worden sind. Hierbei kann nach heutigem Stand des Wissens nicht damit gerechnet werden, dass auf die Beobachtung nach Vorliegen der ersten Messergebnisse verzichtet werden kann. Damit ergeben sich

für die WSV erhebliche Kosten zum einen für die Durchführung von zyklischen Probelastungen und zum anderen für die Langzeit-Überwachung.

Sind die Pfähle zyklischen Lasten ausgesetzt, bleibt durch den in einigen Fällen festgestellten plötzlichen Tragfähigkeitsverlust auch bei Beobachtung des Bauwerkes eine Unsicherheit hinsichtlich der Beurteilung der Standsicherheit. Ein plötzliches Versagen kann durch die Beobachtung nicht ausgeschlossen werden, weshalb Kleinverpresspfähle mit zyklischen Lasten über 20 % der charakteristischen Pfahltragfähigkeit in der WSV zurzeit nicht verwendet werden sollen.

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

In einem Versuchsfeld, in dem vom Zentrum Geotechnik der TU München im Rahmen eines vom Deutschen Institut für Bautechnik und der Bauwirtschaft geförderten Forschungsvorhabens bereits Versuche mit Schwelllasten an Kleinverpresspfählen durchgeführt wurden, sollen an fünf neu hergestellten Kleinverpresspfählen Versuche mit Wechselbelastung durchgeführt werden. Um die Veränderung der Tragfähigkeit von der Schwell- zur Wechselbelastung erfassen zu können, werden die Probelastungen baugleich zu den Pfählen der ersten Versuchsserie ausgebildet. Nach der Durchführung der Probelastungen ist das vorhandene Probefeld auf Grund seiner engen räumlichen Ausdehnung erschöpft. Weitere Versuche sind vorerst nicht geplant.

Die Konzeption, Durchführung und Auswertung der Versuche wird vom Zentrum Geotechnik der TU München durchgeführt. Die Arbeiten werden von der BAW begleitet.

3 Ergebnisse

2010 wurden die 5 Versuchspfähle und die 10 dazugehörigen Reaktionspfähle hergestellt. In 2011 wurde der Versuchsaufbau verändert und das Belastungssystem umgebaut, so dass das Aufbringen von Wechsellasten möglich wurde. Im Anschluss daran wurden folgende Versuche durchgeführt:

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

Die statische Pfahlprobelastung auf Zug wurde durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der 2010 hergestellten Pfähle mit den Pfählen des vorhergehenden Forschungsvorhabens zu belegen. Da bei den nun aufgetragenen Wechsellasten auch Drucklasten aufgebracht werden, wurde zusätzlich eine statische Probelastung auf Druck ausgeführt. In der nachfolgenden Tabelle sind die bei unterschiedlichen Versagenskriterien ermittelten Pfahlwiderstände aus beiden Forschungsvorhaben dargestellt.

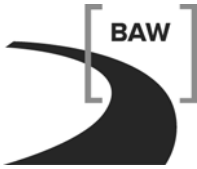
| Versagenskriterium | Pfahlwiderstand | $R_{t,m,i}$ [kN] | |
|---|-----------------|--|---------------------------------|
| | | Pfahl F / B / E (Zug) (vorhergehendes Forschungsvorhaben) | Pfahl 1 (Zug) / Pfahl 2 (Druck) |
| Pfahlkopfverschiebung $s_g = 15 \text{ mm}$ (entspricht 10 % des Pfahldurchmessers) | | 94,8 / 88,5 / 83,3 | 89,5 / 140,0 |
| $k_s \leq 1,0 \text{ mm}$ | | 80,4 / 77,6 / - | 73,5 / 111,0 |
| $k_s \leq 2,0 \text{ mm}$ | | 81,5 / 80,4 / - | 77,5 / 125,0 |

Auf Grund dieser Versuchsergebnisse wurde im Rahmen des ersten Forschungsvorhabens ein charakteristischer Herauszieh Widerstand unter statischer Belastung auf Zug von 80 kN als Referenzwert für die anschließenden Zugschwelllastversuche angesetzt. Als maßgebendes Versagenskriterium wurde hierbei wie auch bei den 2011 durchgeführten statischen Probelastungen das Kriechmaß von 2 mm angesetzt.

Aus der 2011 durchgeführten statischen Pfahlprobelastung auf Zug ergab sich ein charakteristischer Herauszieh Widerstand von ca. 77 kN. Die aus der statischen Probelastung auf Druck ermittelte charakteristische Tragfähigkeit von 110 kN lag deutlich höher als die Tragfähigkeit auf Zug. Im Vergleich zu den im Rahmen des ersten Forschungsvorhabens ermittelten Widerständen wurde zwar ein etwas geringerer Widerstand ermittelt, die Vergleichbarkeit der Pfähle aus beiden Forschungsvorhaben wird dennoch als gegeben angenommen.

Für die im Anschluss durchgeführten Wechsellastversuche wurde der charakteristische Herauszieh Widerstand unter statischer Belastung auf Zug von 77 kN als maßgebender Pfahlwiderstand angesetzt. Die Festlegung der Lastamplitude und des mittleren Lastniveaus erfolgte unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Versuche mit Schwelllasten. Die Wechsellasten sollten, sofern der Pfahl nicht vorher versagt, über 50 000 Lastzyklen aufgebracht werden. Als Versagenskriterien für die Wechsellastversuche wurden eine mittlere absolute Pfahlkopfverschiebung von 15 mm oder eine Verschiebungsspanne (Differenz aus maximaler und minimaler Verschiebung innerhalb eines Lastzyklus) von 15 mm festgelegt.

| Versuchsdaten Pfahl | Lastbild | | | | Zyklusanzahl | Bemerkung |
|------------------------|--------------------------|---------------------------|-----------------------------|------------------------|--------------|---|
| | F _{mittel} [kN] | F _{max,Zug} [kN] | F _{max,Druck} [kN] | F _{zykl} [kN] | N [-] | |
| W \ Belastung 1 | +5 | +20 | -10 | 15 | 58.030 | Kein Versagenskriterium erreicht, Verschiebungen liegen unter 1 mm |
| W \ Belastung 2 | +5 | +40 | -30 | 35 | 3.407 | Versagen auf Grund zu großer mittlerer Verschiebungen und zu großer Verschiebungsspannen |
| Y \ Belastung 1 | +5 | +30 | -20 | 25 | 11.255 | Verschiebungen liegen bis zum Versuchsabbruch durch einen Stromausfall deutlich unter 1 mm, bei Neustart wurde Pfahl auf Grund eines Steuerungsfehlers bis ca. 200 kN belastet |
| Y \ Belastung 2 | +5 | +30 | -20 | 25 | 24.716 | Gleiche Belastung wie Versuch 1, aber auf Grund der erfolgten Belastung bis ca. 200 kN ein deutlich verändertes Tragverhalten, Versagen auf Grund zu großer mittlerer Pfahlkopfverschiebungen |
| X | +5 | +30 | -20 | 25 | 39.919 | Steuerungsfehler bei ca. 40.000 Lastzyklen, Belastung bis ca. 200 kN, daher Auswertung bis N = 39.919 |
| V – Belastung 1 | +15 | +40 | -10 | 25 | 51.681 | Kein Versagen, Pfahlkopfverschiebungen < 2 mm |
| V – Belastung 2 | +15 | +50 | -20 | 35 | 16.172 | Versuchsabbruch auf Grund eines Steuerungsfehlers (maximale Belastung bei ca. 70 kN), Verschiebungen zu diesem Zeitpunkt bei ca. 13 mm |
| V – Belastung 2-2 | +15 | +50 | -20 | 35 | ca. 18.300 | Neustart nach Steuerungsfehler, Versagen auf Grund zu großer Pfahlkopfverschiebungen. Auswertung ist noch nicht abgeschlossen |



4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Jahr 2012

Auf Grund von witterungsbedingten Problemen mit der Versuchssteuerung ist eine zusätzliche zyklische Probelastung an dem Probepfahl geplant, der 2011 statisch auf Druck belastet wurde. Die Versuche können daher erst 2012 abgeschlossen werden. Die Erstellung des Abschlussberichtes und der Abschluss des Vorhabens sollen ebenfalls 2012 erfolgen.

Bewertung dynamischer Pfahlprüfungen von Bohrpfählen

Netzplan-Nr.: A39520270002

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

E-Mail: markus.herten@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Bemessung von Pfählen stützt sich auf empirische Werte oder auf statische Probelastungen [Viana da Fonseca, A. and Santos, J., 2008]. Empirische Werte liegen meist sehr auf der sicheren Seite und sind damit unwirtschaftlich. Die Durchführung statischer Probelastungen ist mit hohen Kosten verbunden. Da die Probelastungen mit deutlichem Vorlauf vor der eigentlichen Baumaßnahme erfolgen sollen, ist eine aufwändige Baustelleneinrichtung erforderlich. Außerdem ist das Ensemble aus Probepfahl und Widerlagerankern oder -pfählen eine komplexe kostenintensive Konstruktion wie in Bild 1. Aus diesem Grund werden vermehrt dynamische Probelastungen ausgeführt.



Bild 1: Widerlagerkonstruktion einer statische Pfahlprobelastung

Die DIN 1054 erlaubt den Einsatz der dynamischen Pfahlprobelastung, überträgt allerdings die Verantwortung für die Richtigkeit der Ergebnisse dem Sachverständigen. Im Zweifelsfall sollen nur empirische Werte verwendet werden. Insgesamt ist die Aussagekraft dynamischer Probelastungen nach wie vor sehr stark umstritten, da nur in wenigen lokal eng begrenzten Fällen (z. B. Hamburger Hafen) direkte Vergleiche von statischen und dynamischen Probelastungen vorliegen. Außerdem gibt es bislang keine verlässlichen Untersuchungen, inwiefern die Durchführung und Auswertung durch unterschiedliche Ingenieurbüros Streuungen unterliegen.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

Die Bundesanstalt für Materialprüfung (BAM) hat auf ihrem Gelände (Außenstelle Horstwalde) eine Reihe von Bohrpfählen installiert, die für Prüfungen der Integrität der Pfähle genutzt wurden und für neuere Verfahren auch weiterhin als Versuchsobjekt dienen. Hier werden zusätzlich acht neue Pfähle gebohrt.

Es sollen an mindestens 5 neuen Pfählen dynamische Prüfungen der Tragfähigkeit durchgeführt werden. Ferner sollen statische Probelastungen an zwei weiteren neuen Pfählen erfolgen. Die Prüfung und Auswertung der dynamischen Pfahlprobelastungen soll von fünf verschiedenen Instituten oder Ingenieurbüros mit entsprechender Erfahrung vorgenommen werden.

3 Ergebnisse

Es liegen noch keine Ergebnisse vor. Im Rahmen von Proberammungen am Dortmund-Ems-Kanal wurden jedoch statische und dynamische Probelastungen an zwei Schleusenstandorten (Gleesen und Bevergern) jeweils an einer geramnten Spundwanddoppelbohle ausgeführt. Es ergaben sich hierbei sehr gute Übereinstimmungen in Bezug auf die vertikale Grenztragfähigkeit.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Anfang 2012: Herstellen der Bohrpfähle und der Rückverankerung für die 2 statischen Probelastungen durch die Firma Bauer Spezialtiefbau
Frühjahr 2012: Durchführung der dynamischen Probelastungen durch 5 verschiedene Institute. Daran anschließend erfolgen die statischen Probelastungen durch die Firma Bauer Spezialtiefbau.
Sommer 2012: Auswertung der Ergebnisse durch die BAM incl. Berichterstellung
2013: Veröffentlichung der Ergebnisse beim Pfahlsymposium Braunschweig

5 Literatur

Viana da Fonseca, A. and Santos, J. (2008) Behavior of Bored, CFA and driven Piles in Residual Soil, ISBN: 978-972-752-104-3, Porto, Portugal

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 die Bauhaus-Universität Weimar (Prof. Witt) 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 der Bauhaus-Universität Weimar 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 Nach-

weismethoden und Bemessungsregeln durchgeführt. Abschließend wurde eine vereinfachte Grenzzustandsfunktion abgeleitet.

Im Jahre 2006 wurde ebenfalls von der Bauhaus-Universität Weimar 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 bindige 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.

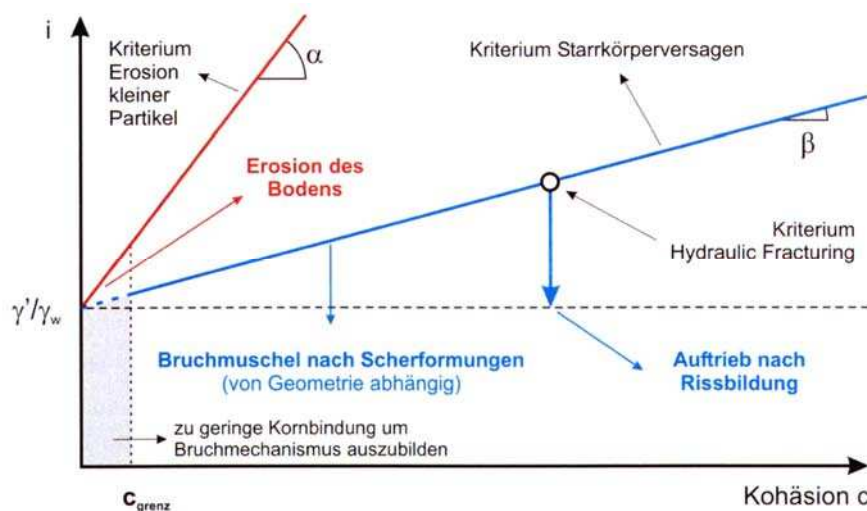


Bild 1: Definition der Versagensformen auf Grundlage von Kohäsion und hydraulischem Gradienten

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 Baugrubenverbau 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 Wassergehalt 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“). 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 Grenzzustandsbedingungen eine gegenseitige Abhängigkeit aufweisen. Für einen bestimmten Satz der Randbedingungen existiert eine noch realisierbare, bodenspezifische, effektive Spannung, die als Grenzzustandsbedingung der Zugfestigkeit des Materials entspricht.

Im abschließenden Untersuchungsabschnitt wurde der etablierte Ansatz zur Bemessung gegen hydraulischen Grundbruch für die spezielle Problemstellung bindiger Böden erweitert. Neben der Optimierung der grundsätzlichen Nachweismethode wurden hierbei zusätzlich Widerstände aus Scherwirkungen, Auflagerreaktion und einer hydraulisch bedingten strukturellen Bodenzerstörung beim Nachweis berücksichtigt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Vorhaben wurde Ende 2011 abgeschlossen. Ein BAW-Abschlußbericht wird noch erstellt.

5 Veröffentlichungen

- 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
- 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
- Wudtke, R.-B.; Witt, K. J.: "Phänomene des Hydraulischen Grundbruchs an Baugrubenwänden", Johann-Ohde-Kolloquium 2007, BAW & TU Dresden, 15.11.2007, Hannover, S. 1 – 7
- 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
- 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
- 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

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.

Auf Grundlage der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen, die sich aus numerischen Berechnungen und Modelluntersuchungen zusammensetzen, 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

Im Auftrag der BAW wurde von der Universität der Bundeswehr München (Prof. Boley) ein Versuchstand zur Visualisierung des Bruchvorganges des hydraulischen Grundbruchs bei der Umströmung einer Spundwand entworfen (Bild 1). Als Versuchsboden wurde ein Fein- bis Mittelsand mit einem Größtkorn von 1 mm und für den Auflastfilter ein gegenüber dem Sand filterstabiler Grobsand-Feinkies verwendet.

Der Porenwasserdruck im Bereich des Spundwandfußes, die Hebung des Bodenkörpers vor der Spundwand und der Durchfluss wurden während der Versuchsdurchführung kontinuierlich messtechnisch erfasst. Der Versuchsverlauf wurde außerdem mittels einer Videokamera sowie durch die Aufnahme digitaler Einzelbilder im zeitlichen Abstand von 1 Minute dokumentiert.

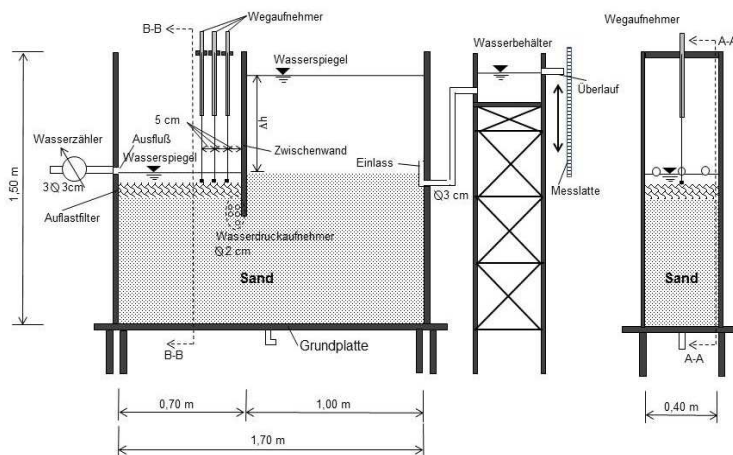


Bild 1: Versuchseinrichtung

Insgesamt wurden 22 Versuche durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuche wurde die Einbindetiefe der Spundwand zwischen 0 und 10 cm variiert. Die Einbaustärken des Filters betragen je nach Versuch 2, 4 oder 6 cm. Während des Versuches wurde die Potentialdifferenz ausgehend von Null bis zum Versagen schrittweise gesteigert, wobei die Dauer der einzelnen Druckstufen in Abhängigkeit von den gemessenen Porenwasserdrücken festgelegt wurde.

Die Versuche zeigten, dass der zeitliche Ablauf des Versagensprozess bei den Versuchen mit einer Filterdicke von 2 cm und denen mit einer Filterdicke von 4 bzw. 6 cm grundsätzlich verschieden ist und belegen somit, dass die Dicke des Filters einen bedeutenden Einfluss auf den Versagensprozess hat. Bei den Versuchen mit der relativ geringen Filterschicht von 2 cm Dicke zeigen sich deutliche Hebungen in dem der Spundwand vorgelagerten Bereich bereits einige Potentialstufen bevor der eigentliche Bruch eintrat. Bei den Versuchen, die mit Filterdicken von 4 und 6 cm durchgeführt wurden, trat der Bruch ein bis drei Minuten nach Beobachtung der ersten Hebungen auf. Beispielhaft sind in Bild 2 für den Versuch mit einer Einbindetiefe $t = 1,0$ cm und einer Dicke des Auflastfilters $d_f = 4,0$ cm die absoluten Bewegungen im Bereich des Spundwandfußes für verschiedene Potentialstufen dargestellt, die mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) Method ausgewertet wurden.

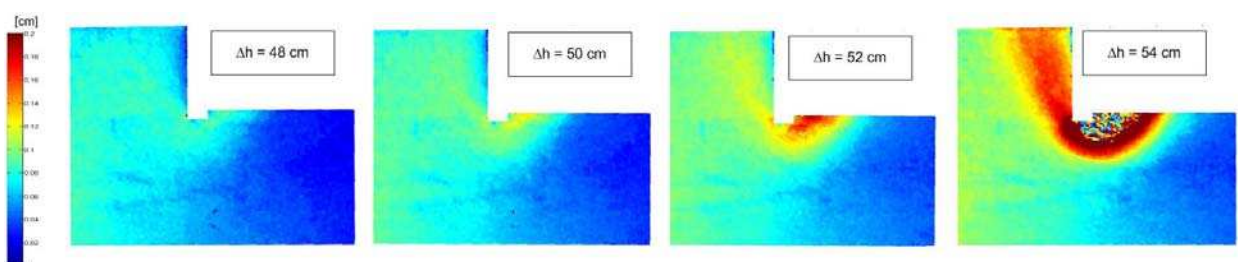


Bild 2: Absolute Bewegungen im Bereich des Spundwandfußes für verschiedenen Potentialstufen

In Bild 3 sind die Ergebnisse der gesamten Versuchsserie zusammen mit den Werten, die sich nach dem theoretischen Verfahren ergeben, als Funktion von $d_f/\Delta h$ und $t/\Delta h$ dargestellt. Die Kurven sind von der Form her ähnlich, die Ergebnisse der Versuche liegen jedoch deutlich unterhalb der theoretischen Werte. Diese Differenz ist in dem idealisierten Bruchkörper und der Vernachlässigung von Scherfestigkeiten im vorliegenden theoretischen Ansatz begründet.

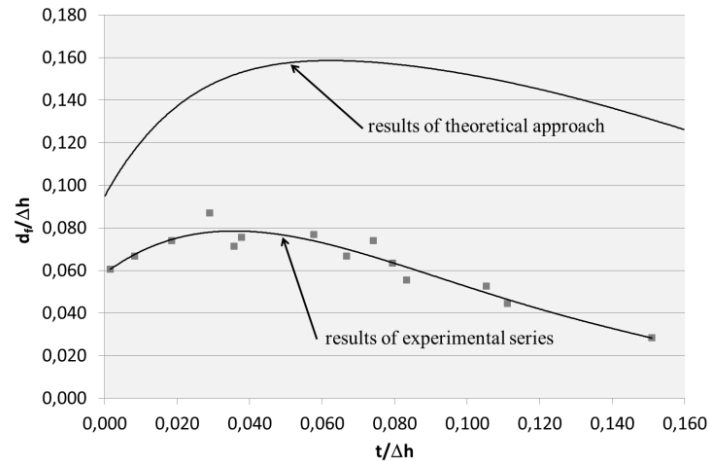


Bild 3: Ergebnisse der Versuchsserie als Funktion von $d_f/\Delta h$ und $t/\Delta h$

Um die mechanische Wirkung eines Auflastfilters umfassend zu analysieren, wurden in einem weiteren Schritt Zylinderdurchströmungsversuche (Bild 4) durchgeführt, bei denen die Böden aus der ersten Versuchsreihe sowie aus Glaskugeln bestehende Körnungen verwendet wurden. Auch bei diesem Versuchsaufbau wurden Porenwasserdrücke, Hebungen des Auflastfilters und der Durchfluss erfasst. Um die Ergebnisse der Modellversuche nachzuvollziehen, wurden ergänzend numerischen Berechnungen mittels Diskrete-Elemente-Methode (Particle Flow Code) durchgeführt.



Bild 4: Versuchsaufbau der Zylinderdurchströmungsversuche

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In 2012 werden die Ergebnisse der Modellversuche beider Versuchsreihen zusammen mit Resultaten der numerischen Berechnungen abschließend beurteilt. Der Abschluss des Vorhabens ist für Ende 2012 mit der Entwicklung eines verbesserten analytischen Berechnungsansatzes geplant.

Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser

Netzplan-Nr.: A39520370002

Projektleiter: Dr.-Ing. H. Montenegro, Abteilung Geotechnik, Referat Grundwasser (G 3)

E-Mail: hector.montenegro@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

Flussauen stellen Ökosysteme dar, die in starkem Maße von einer hydraulischen Anbindung des Grundwassers an das Oberflächenwasser geprägt sind. Aufgrund dieser Anbindung kann die Flusswasserstandsdynamik die Grundwasserverhältnisse maßgebend, mitunter weit bis in das Hinterland, bestimmen. Änderungen der Abflussverhältnisse oder des hydraulischen Anschlusses an der Gewässersohle, beispielsweise durch Anpassungsmaßnahmen, wirken somit unmittelbar auf das Grundwasserregime und letztlich auf den Wasserhaushalt der Aue.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Austauschprozesse zwischen Oberflächen- und Grundwasser (Leakageflüsse) sind messtechnisch kaum zu erfassen, das Prozessverständnis ist derzeit lückenhaft. Der Leakagefluss Q_L bei Infiltration unterscheidet sich in der Regel von dem bei Exfiltration von Grundwasser in das Oberflächen-gewässer (bei gleicher Potentialdifferenz dh zwischen den Wasserkörpern). Ferner gibt es Hinweise, dass die dh - Q_L -Beziehung einen hysteretischen Verlauf im Auf- und Ablauf eines Hochwasserereignisses aufweist. Gerade für Prognose der Auswirkungen einer wasserbaulichen Maßnahme auf die Grundwasserverhältnisse ist ein vertieftes Prozessverständnis der Austauschprozesse zwischen Oberflächen- und Grundwasser unerlässlich.

In neueren Modellentwicklungen werden die Oberflächenwasserströmung und die Grundwasserströmung gekoppelt berechnet. Es ist derzeit noch unklar, ob gekoppelte Modelle den derzeit üblichen Ansätzen, bei denen die Ergebnisse der hydrodynamischen Berechnung quasi als Randbedingung in die Grundwasserströmungsberechnung eingehen, tatsächlich überlegen sind. Eine wesentliche Schwierigkeit für die Bewertung verschiedener Ansätze ist das Fehlen hinreichend aufgelöster Naturmessungen des Wasseraustauschs zwischen den Wasserkörpern zur Validierung unterschiedlicher Modellansätze.

1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund gestiegener Anforderungen an die Belastbarkeit von Prognosen der grundwasserhydraulischen Auswirkungen von wasserbaulichen Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen an Bundeswasserstraßen, ist ein besseres Verständnis der Austauschprozesse zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser unerlässlich. Dies erfordert die Erfassung räumlich und zeitlich hoch aufgelöster Naturmessungen von Oberflächen- und Grundwasserständen. Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens werden in einem gut untersuchten Rückdeichungsgebiet diese Daten bei stark veränderlichen Bedingungen wie dem Einströmen und dem Ablauf einer Hochwasserwelle erhoben.

1.3 Untersuchungsziel

Zentrales Ziel des Forschungsvorhabens ist es, das Prozessverständnis des Wasseraustauschs zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser zu vertiefen. Voraussetzung hierfür sind räumlich und zeitlich hinreichend aufgelöste Daten der Wasserstände im Oberflächen- und Grundwasser. Auf Grundlage eines digitalen Geländemodells (DGM) können die gemessenen zeitlichen Wasserstandsänderungen $[L/T]$ in den Flutrinnen des Untersuchungsgebiets in Wasserflüsse Q_L $[L^3/T]$ umgerechnet und den zugehörigen hydraulischen Gradienten dh $[-]$ zwischen Flutrinne und Grundwasser zugeordnet werden. Die so bestimmte Q_L - dh -Beziehungen sind dahingehend zu untersuchen, in wie weit die Veränderung der Kontaktfläche zwischen Oberflächengewässer und Grundwasserleiter die zeitliche Austauschdynamik beeinflusst und welche Rolle Erosions- und Sedimentationsprozesse spielen.

2 Untersuchungsmethoden

Konzeption von Oberflächenwassermessstellen

Aus den Untersuchungen zur Einströmung in das Deichrückverlegungsgebiet (Referat W2) geht hervor, dass bei Einströmungsereignissen große Zuflüsse auftreten und folglich mit erheblichen Strömungskräften im Vorlandbereich zu rechnen ist. Hieraus ergeben sich besondere Anforderungen an die Robustheit der Oberflächenwassermessstellen. Diese Anforderungen wurden bei der Konzeption der in Bild 2 dargestellten Oberflächenwassermessstellen berücksichtigt. Die Messstelle besteht aus einem dickwandigen perforierten Rohr, das in einem 1 m tiefen Betonfundament fixiert ist. Innerhalb des äußeren Rohr befindet sich ein weiteres Filterrohr, in das der Druckaufnehmer eingehängt wird. Zur Erhöhung der Gesamtstabilität ist der Zwischenraum mit an die Filterschlitzweite beider Rohre angepasstem Filterkies verfüllt, der zudem einen übermäßigen Eintrag von Schwebstoffen verhindert.

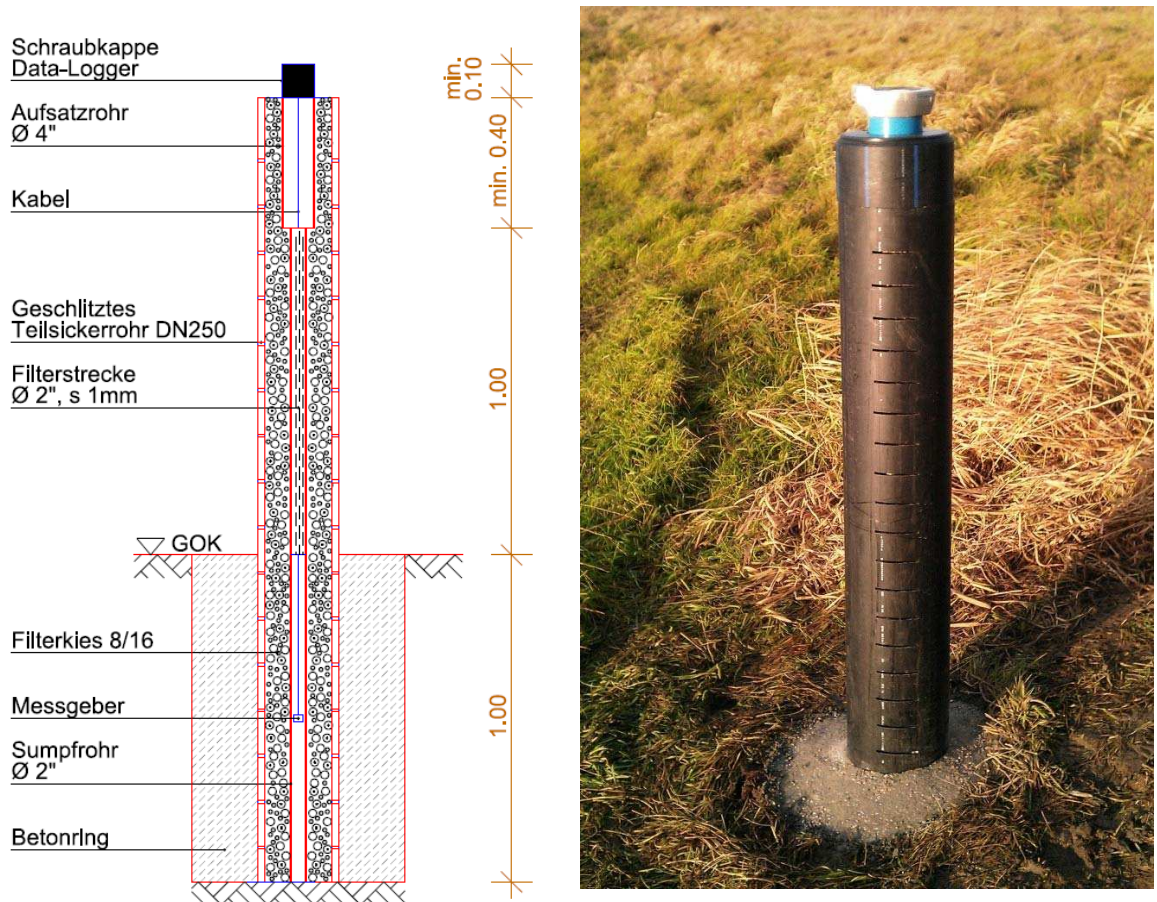


Bild 1: Systemskizze (links) und Foto (rechts) einer Messstelle zur Erfassung der Wasserstände bei Überflutungsereignissen.

Die Messdatenerfassung in einem Naturschutzgebiet bedingt, zumindest zeitweise, erhebliche Zugangsrestriktionen. Daher wurde ein Datenerfassungssystem mit Datenfernübertragung ausgewählt. Um die Batterien zu schonen, ist es ferner erforderlich den Messtakt an die tatsächlichen Strömungsereignisse anzupassen, was sich ebenfalls per Fernübertragung bewerkstelligen lässt.

Installation der Oberflächenwassermessstellen zur Erfassung der Überflutungsdynamik

Um das Ein- und Abfließen von Hochwasserereignissen im Deichrückverlegungsgebiet detailliert zu erfassen, konnten mit Unterstützung der Bundesanstalt für Gewässerkunde (KLIWAS Vorhaben 5.06 „Auswirkungen des Klimawandels auf die Vegetation der Flussauen“) und in Abstimmung mit dem BAW-Referat W2 Oberflächenwassermessstellen eingerichtet werden. Die Lage der Oberflächenwassermessstellen sowie das Relief im Untersuchungsgebiet sind in Bild 2 dargestellt.

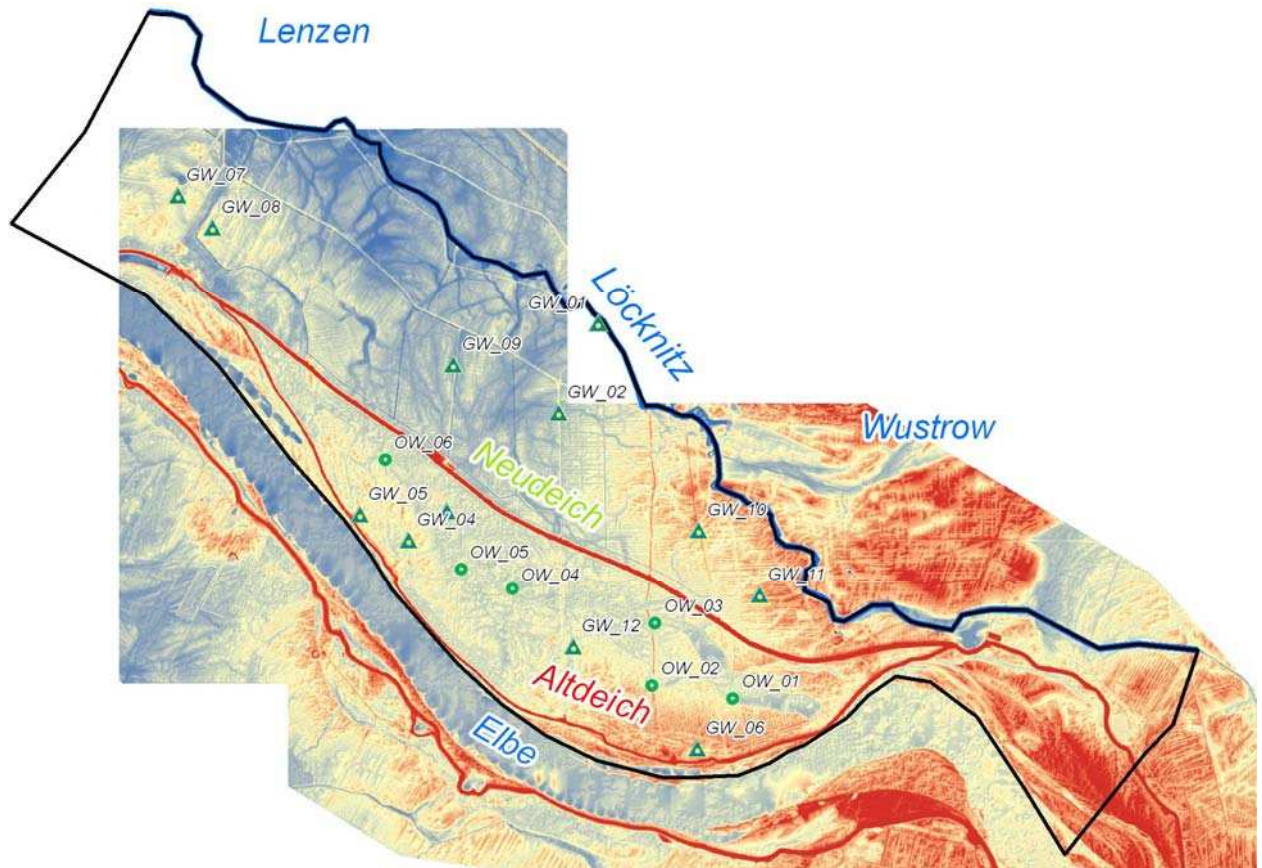


Bild 2: Relief (rot: hoch, blau: tief) im Deichrückverlegungsgebiet Lenzen und Lage der Oberflächenwassermessstellen (Kreise) und Grundwassermessstellen (Dreiecke).

3 Ergebnisse

Im Jahr 2010 kam es mehrfach zur Überströmung des Rückdeichungsgebiets, während 2011 dies nur im Frühjahr erfolgte. Die Ereignisse 2010 konnten mit einem provisorischen System an 5 Grundwassermessstellen (GWM) erfasst werden. Ab April 2011 wurden sämtliche 13 GWM instrumentiert.

Die Oberflächenwassermessstellen (OWM) konnten im September 2011 erstellt und im Dezember 2011 instrumentiert werden. Erste Messungen beim Auflaufen des Winterhochwassers zeigten, noch vor Einströmung der Hochwasserwelle, einen deutlichen Wasseranstieg im Gelände von über 1 m, was vorwiegend auf Grundwasserzuflüsse zurück zu führen ist. Aufgrund des guten hydraulischen Anschlusses zwischen Elbe und Grundwasser, steigt beim Anstieg des Flusswasserstands das Grundwasserpotential unmittelbar an und führt zu großen Grundwasserexfiltrationen in den Flutrinnen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- Erstellung eines Grundwassermodells zur Simulation beobachteter Ein- und Auströmungsereignisse im Rückdeichungsbereich bei Lenzen,
- Einrichtung einer Schnittstelle zur Übernahme der bestehenden 2D-hydrnumerischen Berechnungen vom Referat W2 als Randbedingung für das GW-Modell und
- Simulation der Grundwasserströmung für beobachtete Einströmungsereignisse (nicht gekoppelter Ansatz).

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“ (GBB), die die theoretischen Bemessungsgrundlagen nach dem derzeitigen Stand der Technik beinhalten. Zur Erleichterung der Anwendbarkeit des GBB wurden die Berechnungsalgorithmen zusätzlich in einer Software „GBBSofT“ umgesetzt. Die überwiegend auf Erfahrungen beruhenden, parameterbehafteten Bemessungsansätze müssen jedoch weiter präzisiert werden. Dazu ist es erforderlich, verstärkt praktische Erfahrungen mit bestehenden Deckwerken zu sammeln, zu dokumentieren und systematisch auszuwerten, um auf dieser Grundlage die Bemessungsansätze zu validieren und kontinuierlich bedarfsgerecht weiterzuentwickeln. Aus diesem Grund wurde vor einigen Jahren mit einer umfassenden, langfristig angelegten Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerken der WSV begonnen. Dabei werden möglichst viele unterschiedliche Wasserstraßenabschnitte hinsichtlich des Erhaltungszustandes der Deckwerke und des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Randbedingungen und der hydraulischen Belastung im Vergleich zu den theoretisch erforderlichen Deckwerksabmessungen begutachtet. Das Ziel besteht letztendlich darin, die Deckwerkbauweisen an Binnenwasserstraßen durch Präzisierung der theoretischen Grundlagen auf der Basis der Ergebnisse der Bestandsaufnahme sukzessiv weiter zu optimieren.

1.2 Bedeutung für die WSV

Einer hinsichtlich Standsicherheit und Kosten optimalen Bemessung der Deckwerke hinsichtlich der hydraulischen Belastungen infolge Schifffahrt kommt aufgrund des großen Investitionsvolumens bei Ufersicherungen in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes ein hoher Stellenwert zu.

1.3 Untersuchungsziel

Auf der Grundlage der Bestandsaufnahme von Deckwerken erfolgt für jeden Untersuchungsabschnitt eine vergleichende Dokumentation des ermittelten Soll- und Istzustandes der Deckwerke. Es werden Zustandsanalysen unter Berücksichtigung der konkreten geometrischen, geotechnischen und hydraulischen Randbedingungen sowie umfassende Schadensanalysen durchgeführt. Auf der Grundlage der Ergebnisse werden die bestehenden Berechnungsgrundlagen validiert. Das Vorschriftenwerk der WSV wird dementsprechend immer wieder angepasst, so dass die Deckwerke hinsichtlich Standsicherheit und Kosten zunehmend weiter optimiert werden können.

2 Untersuchungsmethoden

Folgende Untersuchungsmethoden kommen zur Anwendung:

- Erfassung des Zustandes der Deckwerke und der technischen Randbedingungen (z. B. Geometrie, Baugrund) in situ sowie des Unterhaltungsaufwandes in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten,
- Durchführung von Naturmessungen in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten zur Ermittlung der hydraulischen Uferbelastungen infolge Schifffahrt,
- Theoretische Berechnungen zur Ermittlung der erforderlichen Deckwerksabmessungen unter den ermittelten Randbedingungen unter Verwendung der Software GBBSofT, Vergleich mit den jeweils ermittelten Istzuständen,

- Auswertung der Ergebnisse, Validierung der Bemessungsansätze (GBB),
- Untersuchungen zu neuen Möglichkeiten der Erfassung des Zustandes des Deckwerks über und unter Wasser,
- Formulierung von Empfehlungen für die Bemessung und Ausführung von Deckwerken.

3 Ergebnisse

Bisher wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Deckwerke in 8 unterschiedlichen Wasserstraßenabschnitten begutachtet: in der Süd- und Nordstrecke des Dortmund-Ems-Kanals, am Wesel-Datteln-Kanal, am Main-Donau-Kanal, am Mittellandkanal und der Unteren Havel-Wasserstraße. Dabei handelte es sich um durchlässige Deckwerke überwiegend aus losen Wasserbausteinen, nur am MLK wurden auch Deckwerke aus teil- und vollvergossenen Wasserbausteinen untersucht. Die Ergebnisse wurden ausgewertet und in Teilberichten dargestellt und bildeten u. a. die Grundlage für eine Optimierung der Bemessungsansätze des GBB. 2011 konnte eine überarbeitete Fassung des GBB veröffentlicht werden. Wichtige Ergebnisse wurden im Mai 2010 auf der 32. PIANC-Konferenz in Liverpool vorgestellt und in den Tagungsunterlagen veröffentlicht (Fleischer, P., Kayser, J.: Experience with revetments for inland waterways in Germany, 32. PIANC Congress, Liverpool, Großbritannien, 12. bis 14. Mai 2010).

Schwerpunkt der Arbeiten im Jahr 2011 bildeten Untersuchungen in Streckenabschnitten des DEK – in der Nordstrecke von km 108,300 bis km 138,300 und in der Südstrecke im Los 14 (km 79,350 bis km 84,000) und im Los 15 (km 84,000 bis km 88,965). Die Deckwerke in diesen Abschnitten wurden bereits 2006 bzw. 2003/ 2005 begutachtet und das Ergebnis in Teilberichten dokumentiert. Das Ziel der erneuten Analysen bestand darin, zwischenzeitliche Zustandsveränderungen zu ermitteln. Dies ist auch in anderen Strecken vorgesehen, um die Langzeitstabilität von Deckwerken bei bereits festgestellten Abweichungen vom Sollzustand oder Unterbemessung und ggf. zunehmenden Schiffsbelastungen beurteilen zu können. Im Juni 2011 erfolgten Bereisungen der o. g. Wasserstraßenabschnitte mit dem zuständigen Wasser- und Schifffahrtsamt Rheine.

Im betrachteten nicht gedichteten Streckenabschnitt des Nordteils des DEK beträgt die Wassertiefe planmäßig 3,50 m bei einem n-Verhältnis von nur etwa 4,1. Frühere Untersuchungen hatten bereits gezeigt, dass die Böschungsdeckwerke aus losen Wasserbausteinen der Klasse CP_{90/250} für den bestehenden Schiffsverkehr (maximal Europaschiffe mit 2,70 m Abladetiefe) nicht ausreichend bemessen sind. 10 % der Schiffe erzeugen danach Belastungen, die theoretisch zu Schäden im Deckwerk führen. Dass Schäden auch praktisch auftreten, wurde bereits bei den Untersuchungen 2006 durch die hohen Unterhaltungsaufwänden des WSA bestätigt. Die Sanierung der Schadstellen erfolgt laufend durch Nachschütten von losen Steinen. Dabei ist es wichtig, dass die Steine nicht nur im Wasserwechselbereich eingebaut werden, sondern über die gesamte Böschung, da ansonsten sehr steile Böschungen entstehen, die langfristig ggf. nicht mehr standsicher sind. Im Mittel werden hier jedes Jahr 0,2 bis 2 t Steine pro laufenden Meter Kanalufer verbaut. Bei der Bereisung 2011 konnte ein vergleichsweise guter Zustand der über Wasser sichtbaren Deckwerksteile festgestellt werden (Bild 1). Die Ergebnisse aus der DEK-Nordstrecke zeigen, dass Deckwerke aus losen Wasserbausteinen bei begrenzter Unterbemessung (hier für 10% der Schiffe) akzeptiert werden können, wenn Schadstellen durch laufende Unterhaltung zeitnah saniert werden. Allerdings ist dafür ein entsprechend hoher Unterhaltungsaufwand einzuplanen. Ist eine Zunahme der Schiffsverkehrs bzw. Zulassung größerer Schiffe vorgesehen, müssen erneute Untersuchungen zur Standsicherheit der Deckwerke durchgeführt werden.

Ähnliches trifft auch auf die nicht gedichteten Abschnitte des Loses 14 der DEK-Südstrecke zu. Auch hier zeigte sich bei der Bereisung im Juni 2011 der über Wasser sichtbare Teil der Deckwerke aus losen Wasserbausteinen der Klasse II (vor Ort ermittelt: CP_{90/250}) auf einem Zweistufenminerkornfilter in einem im Vergleich zu den Untersuchungen 2003 guten Zustand. Hier waren bereits kurz nach Ausbau (1999) entsprechend Wasserstraßenklasse Vb erste Schäden durch Steinverlagerungen festgestellt worden. Durch umfangreiche Nacharbeiten von 2001 bis 2006 (Kosten ca. 7 Cent/m²) und inzwischen regelmäßige Unterhaltung können die Deckwerke heute in ausreichendem Maße das Ufer schützen.



Bild 1: DEK-Nordstrecke



Bild 2: DEK, Los 15

Das Los 15 des DEK wurde 2002 fertig gestellt. Es ist überwiegend mit 20 cm Ton, in einem Abschnitt von 500 m mit einer Bentonitmatte gedichtet. Als Schutzschicht fungieren auch hier lose Wasserbausteine der Klasse IIa bzw. III (vor Ort ermittelt: CP_{90/250}) in einer Schichtdicke von 60 cm auf einem Geotextil. Sichtbare Schäden wurden bisher im Wasserwechsel- und Überwasserbereich nicht festgestellt, auch nicht während der Bereisung 2011 (Bild 2). Bei 2007 turnusgemäß durchgeführten Verkehrssicherungspeilungen, d.h. Echolotmessungen mit der „MS Westfalen“, die im Rahmen dieses Forschungsprojektes detailliert hinsichtlich des Erkennens von Deckwerksschäden im Sohlen- und unteren Böschungsbereich ausgewertet wurden, zeigte sich allerdings eine sehr unregelmäßige Sohlenoberfläche mit lokal großen Übertiefen, die auch in den Verkehrssicherungspeilungen 2010 bestätigt wurden. Zur Klärung wurden in 7 ausgewählten Sohlbereichen kurzfristig Stangenpeilungen (Tellerdurchmesser der Spitze: 10 cm) und am 21. Juli 2011 Taucheruntersuchungen durchgeführt. Die Bereiche mit großen Übertiefen und zum Teil fehlender Deckschicht wurden mit diesen zusätzlichen Untersuchungen bestätigt. Es gibt auch Bereiche, in denen nur noch eine Steinlage vorhanden. Aufgrund der nach den Echolotergebnissen überwiegend regelmäßigen Verteilung der Fehlstellen in Längs- und Querrichtung erscheint es möglich, dass die Fehlstellen bereits herstellungsbedingt entstanden sind – z. B. durch falsche Positionierung des Schüttgerüsts (zu große Abstände, um ein Überlappen der Steinschüttung zu vermeiden). Diese Schwach- bzw. Fehlstellen im Deckwerk könnten sich unter der Schifffahrtsbelastung mit der Zeit vergrößert haben. Die gefundenen Schadstellen wurden kurzfristig vom WSA saniert.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass Echolot-Verkehrssicherungspeilungen, die bisher schwerpunktmäßig hinsichtlich Untiefen als Gefahr für die Schifffahrt ausgewertet werden, auch sehr gut zur Beurteilung der Deckwerksoberfläche hinsichtlich eines qualitätsgerechten Einbaus, aber auch langfristig hinsichtlich Deckwerksschäden herangezogen werden können. Das Merkblatt zur Anwendung von Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen MAR (2008) empfiehlt deshalb zum Nachweis einer qualitätsgerechten Deckwerksherstellung zusätzlich die Durchführung von Flächenpeilungen. Außerdem sollten die Verkehrssicherungspeilungen zukünftig insbesondere in Dichtungsstrecken regelmäßig auch hinsichtlich des Zustandes der Deckschichten ausgewertet werden, um Fehlstellen und eine möglich Gefährdung der Dichtung rechtzeitig zu erkennen.

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

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 aufbrachten 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).

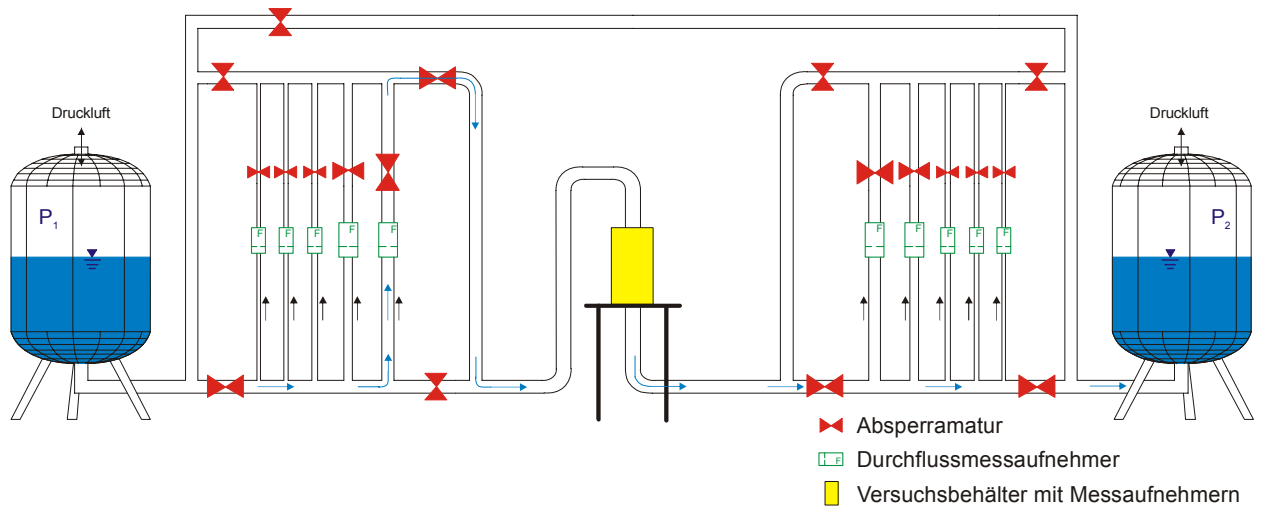


Bild 1: Skizze der neuen Wechseldurchströmungsanlage

3 Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde die neue Anlage weiter aufgebaut, aufgrund der personellen Situation konnten die Arbeiten jedoch nicht abgeschlossen werden. Neue Versuche waren noch nicht durchführbar.

An der völlig überarbeiteten Wechseldurchströmungsanlage steht zunächst eine intensive Prüfung der Anlage und Neuaufbau der Steuerung und Messwerterfassung im Vordergrund. Diese Arbeiten werden in 2012 mit einem u. a. hierfür eingestellten Elektrotechniker 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:

2012: 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.

2013: Systematische Untersuchung unterschiedlicher Materialkombinationen.

Prüfung von Geotextilien als Grundlage für die Überarbeitung des MAG.

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. Anwendungsgrundlage 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 einen zunehmend 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 gemeinsamen Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Untersuchungen zur hydraulischen Belastbarkeit und ökologischen Wirksamkeit technisch-biologischer Ufersicherungen mit dem Ziel durchgeführt, Anwendungsempfehlungen und Bemessungsgrundlagen für deren Einsatz an Binnenwasserstraßen zu erarbeiten.

1.2 Bedeutung für die WSV

Mit den Untersuchungsergebnissen werden dem planenden Ingenieur der WSV sukzessiv fundierte Grundlagen zur Anwendung von technisch-biologischen Ufersicherungen zur Verfügung gestellt. Damit steht eine wichtige Entscheidungshilfe zur Verfügung, wenn im Rahmen von Unterhaltungs-, Ausbau- und Neubaumaßnahmen an Binnenwasserstraßen anstelle konventioneller alternative naturnahe Ufersicherungsmaßnahmen angewendet werden sollen.

1.3 Untersuchungsziel

Technisch-biologische Ufersicherungsarten, die sich aufgrund der Untersuchungen als geeignet für die Anwendung an Wasserstraßen erweisen, werden in einem Regelwerk zusammengestellt. Deren Belastbarkeit wird speziell hinsichtlich der besonderen Uferbelastungen infolge Schifffahrt, für die es bisher so gut wie keine Erfahrungswerte gibt, quantifiziert. Dabei fließen auch die Ergebnisse des parallel laufenden Forschungsprojektes „Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit“ (A39520470002) zur gleichen Thematik mit ein.

2 Untersuchungsmethoden

Da das Projekt eine Gemeinschaftsarbeit der Referate Erdbau und Uferschutz (G4, federführend) und Schiff/Wasserstraße, Naturuntersuchungen (W4) der BAW sowie der Referate Landschaftspflege/Vegetationskunde (U3) und Tierökologie (U4) der BfG ist, können sowohl technische als auch biologische Aspekte 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,
- Auswertung der Gesamtergebnisse, Formulierung von Bemessungsansätzen.

3 Ergebnisse

Das zur Thematik der alternativen Ufersicherungen an Wasserstraßen eingerichtete gemeinsame Internet-Fachportal der BAW und BfG wurde 2011 überarbeitet, aktualisiert und in englischer Sprache erweitert (<http://ufersicherung.baw.de/de/index.html>). Hier sind neben Veröffentlichungen und Vorträgen auch Berichte zu speziellen Themen 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. Alle Randbedingungen, Mess- und Untersuchungsergebnisse sowie Ergebnisse zur Belastbarkeit der vorhandenen technisch-biologischen Ufersicherungen sind dokumentiert. Die wichtigsten Ergebnisse aus beiden Berichten wurden außerdem in den BAW-Briefen 2/2006 bzw. 1/2011 veröffentlicht.

Schwerpunkt der Arbeiten im Jahr 2011 bildeten die Vorbereitungen und die Realisierung einer neuen Versuchsstrecke am Rhein bei Worms. Träger der Maßnahme ist das WSA Mannheim. Mit dem Bau der Versuchsstrecke an einem Rheinabschnitt, an dem täglich ca. 120 Schiffe verkehren, sollen erstmalig Erfahrungen an einer hoch frequentierten Wasserstraße gesammelt werden. Von km 440,6 bis km 441,6 wurden von September bis Dezember 2011 neun verschiedene Varianten technisch-biologischer Ufersicherungsmaßnahmen eingebaut. Grundlage ist das Gutachten der BAW und BfG „Errichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer - Empfehlungen für die Ausführung der Ufersicherungen“ vom 7.5.2010, das ausführlich die vorgeschlagenen Uferbauweisen beschreibt und die Randbedingungen in diesem Rheinabschnitt dokumentiert. Bei der Wahl und Anordnung der alternativen Bauweisen waren insbesondere die hydraulischen Belastungen am Ufer infolge der Schifffahrt zu berücksichtigen. Diese nehmen aufgrund der unterschiedlichen Uferabstände der Fahrrinne (23 m bei km 440,600 und ca. 140 m bei km 441,600) in Fließrichtung ab. Weiterhin mussten die stark schwankenden Wasserstände am frei fließenden Fluss (6 m Unterschied zwischen GIW und HSW) beachtet werden.

In fünf Abschnitten wurde die vorhandene Steinschüttung entfernt und durch neue alternative Maßnahmen ersetzt, in einem Abschnitt blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In vier Abschnitten erfolgten ökologische Aufwertungen der weiterhin mit Wasserbausteinen gesicherten Böschung. Eine umfassende Dokumentation der neuen Ufersicherungsmaßnahmen erfolgte in einem gemeinsamen Bericht der BAW, BfG und dem WSA Mannheim. Tabelle 1 gibt eine Übersicht der neu eingebauten Ufersicherungsmaßnahmen, Bild 1 zeigt beispielhaft Fotos der Versuchsstrecke nach Fertigstellung.

Tabelle 1: Übersicht der neu eingebauten Ufersicherungsmaßnahmen (VF = Versuchsfeld)

| VF | km | Neue technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen |
|------|---------------------|---|
| VF 1 | 440,630 bis 440,800 | Steinschüttung mit Weidensetzstangen, Lebendfaschinen, Busch- und Heckenlagen, Steinwall mit Flachwasserzone, Totholzstämmen mit Wurzelteller |
| VF 2 | 440,820 bis 440,860 | Weidenspreitlagen, diagonal zur Fließrichtung verlegt |
| VF 3 | 440,880 bis 440,950 | Weidenspreitlagen, quer zur Fließrichtung verlegt |
| VF 4 | 440,950 bis 441,000 | Steinschüttung mit Kiesfüllung, Einzelsteingruppen, Totholzfaschinenbündel |
| VF 5 | 441,000 bis 441,110 | Entfernung der Steinschüttung, Einbau von Röhrichtgabionen und Steinmatrizen auf Kornfilter, Pflanzmatten und Heckenlagen |
| VF 6 | 441,125 bis 441,200 | Steinschüttung mit Oberboden-Alginatgemisch-Füllung, Nassansaat, Einzelpflanzen |
| VF 7 | 441,200 bis 441,375 | Entfernung der Steinschüttung, Einbau von vorgezogenen Pflanzmatten auf verschiedenen Filtermatten (Schafwollvlies, Geotextil, Kokosmatte), Totholzfaschinen, Vegetationswalzen, Nassansaat |
| VF 8 | 441,375 bis 441,475 | Steinschüttung und Pflaster mit Röhrichtbewuchs, Erhöhung des vorhandenen Steinwalls |
| VF 9 | 441,475 bis 441,600 | Entfernung der Steinschüttung, Zulassen freier Erosion und Sukzession, Ausfachungsbühne, Setzstangen |

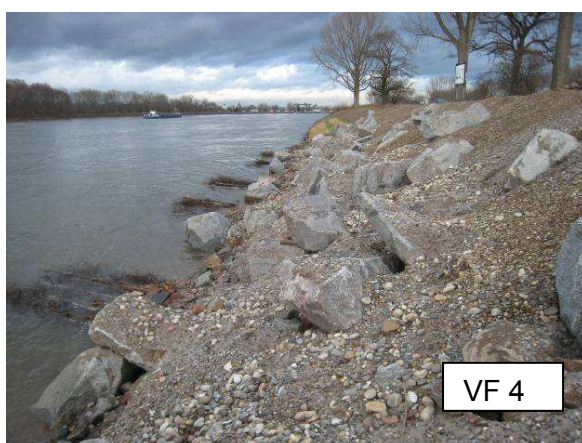


Bild 1: Fotos einzelner Versuchsfelder nach Fertigstellung im Dezember 2011

Im Ergebnis des Naturversuchs werden wichtige Erkenntnisse zur Anwendung alternativer technisch-biologischer Ufersicherungen am Rhein, aber auch an anderen Wasserstraßenabschnitten erwartet. Als Grundlage für die Beurteilung der neuen Ufersicherungsmaßnahmen wurde 2011 ein umfangreiches und detailliertes Monitoringprogramm aufgestellt, das zunächst über einen Zeitraum von 5 Jahren nach Fertigstellung der Baumaßnahme durchgeführt wird. Danach ist eine Beobachtung in größte-

ren Zeitabständen vorgesehen. Ziel ist eine Bewertung der unterschiedlichen technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich der technischen (Gewährleistung der Uferstabilität) und ökologischen Wirksamkeit sowie des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Anfang 2012 wird das Monitoring im Bereich der Versuchsstrecke beginnen, erste Zwischenauswertungen werden durchgeführt. Parallel dazu werden die Untersuchungen in weiteren ausgewählten bestehenden Wasserstraßenabschnitten mit alternativen Ufersicherungen fortgesetzt. Die bisher im Rahmen des Forschungsprojektes gesammelten Erfahrungen werden 2012 in Steckbriefen zu einzelnen technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen zusammengestellt und über das Internetportal veröffentlicht. Mit weiterem Erkenntnisgewinn wird eine laufende Aktualisierung dieser Steckbriefe erfolgen, so dass der Praxis zeitnah erste Ergebnisse zur Verfügung stehen. 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.

Ausbildung von Dichtungsanschlüssen im Streckenbereich von Wasserstraßen

Netzplan-Nr.: A39520410217

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

E-Mail: jan.kayser@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

Folgende Schritte und Untersuchungsmethoden sind im Einzelnen vorgesehen:

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

Zu 3.: Durchdringung von Bauteilen durch Oberflächendichtungen aus Ton

Ein Aspekt der Dichtungsanschlüsse ist die Durchdringung von Tondichtungen mit Bauteilen. Im Zuge des Ausbaus gedichteter Wasserstraßen kann es erforderlich werden, Bauteile wie z. B. Spundwände oder Stahlprofile durch vorhandene Tondichtungen in den Untergrund einzubringen. Dies ist insbesondere im Bereich neu zu bauender Bauwerke, aber auch bei Wasserstraßen im Rechteckprofil (Uferbefestigung mit Spundwänden) der Fall. Bei der Durchdringung der Tondichtung besteht die Gefahr, dass eine offene Fuge zwischen dem Bauteil und der Dichtung entsteht.

Auch können Risse in der Dichtung entstehen, wie das Bild einer durch die Tondichtung gerammten Spundwand zeigt. Hier ist eine Dichtung im Spundwandtal aufgerissen zudem ist an einer Spüllanze ein ringförmiger Hohlraum entstanden.



Bild 1: Durchdringung einer Spundwand durch eine Tondichtung

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

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

Ebenso ist der Eindringvorgang in die Dichtung zu simulieren, z. B. [Henke; Grabe, J., 2009].

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

Erarbeitung einer StoffgesetZRoutine für Ton

Für die Modellierung ist ein geeignetes Stoffgesetz zu finden. Hierbei ist das Verhalten des Dichtungstons bei Wechsellast abzubilden, da dieses für eine mögliche Spaltbildung wesentlich ist. Die für das Stoffgesetz erforderlichen Parameter sind in Laborversuchen an typischen Dichtungstönen zu ermitteln.

Bodenmechanische Laborversuche

Für die experimentellen und numerischen Untersuchungen werden eine Sand- und eine Tonschicht betrachtet. Die entsprechenden Parameter für die Stoffmodelle werden mit Hilfe bodenmechanischer Laborversuche ermittelt:

Numerische Untersuchungen

Zur Untersuchung der Frage, ob bzw. unter welchen Bedingungen bei der Bauteilpenetration der Ton in die Sandschicht verschleppt wird, werden Computersimulationen auf der Grundlage der Finite-Elemente-Methode (FEM) durchgeführt. Dabei wird die quasi-statische Penetration des Bauteils bei konstanter Eindringgeschwindigkeit in einen Untergrund bestehend aus einer dünnen Tonschicht und einer darunter anstehenden Sandschicht simuliert.

Zur Untersuchung der Hypothese der horizontalen Verdrängung des Tons durch Biegeschwingungen des Bauteils werden Computersimulationen basierend auf der FEM durchgeführt. Hier wird die Bau-

teilpenetration bei harmonischer und impulsartiger Belastung simuliert. Um eine Biegeschwingung des Bauteils zu ermöglichen, wird von Anfangsimperfektionen des Systems Ramme/Bauteil bzw. Vibrationsramme/Bauteil ausgegangen.

Modellversuche

Zur Untersuchung der Hypothesen zur Spaltbildung zwischen Bauteil und im Ton werden ergänzende 1g-Modellversuche durchgeführt. Da eine vollständige Modellähnlichkeit hier nicht erfüllt werden kann, haben diese Versuche einen rein qualitativen Charakter. Die Modellversuche werden in Anlehnung an die numerisch untersuchten Situationen geplant und umgesetzt. Sofern technisch möglich, wird die Bewegung des Bodens mittels Particle-Image-Velocimetry (PIV) ermittelt. Zudem werden wesentliche Größen, wie z. B. der Eindringwiderstand des Bauteils, eventuell auftretende Porenwasserdrücke im Boden, Erddrücke am eindringenden Bauteil und die Sackungen bzw. Hebungen an der GOK nach Durchführung der Versuche erfasst.

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 Asphalt dichtungen an Bauwerke [EAAW].

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.

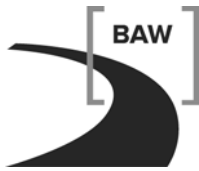
Für die Bewertung von Undichtigkeiten an Dichtungsanschlüssen, aber auch an singulären Leckagen wie Durchwurzelung oder Schiffsanfahrungen, zeigen die Berechnungsergebnisse, dass die Dichtigkeit eines Dichtungsanschlusses auch immer im Zusammenhang mit der Durchlässigkeit des umgebenden Bodens zu bewerten 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.

In den Berechnungen wurde die Dichtung als poröses Medium angesetzt. Im Falle einer Schädigung der Dichtung, z. B. an einem Anschluss, aber auch infolge Durchwurzelung oder durch mechanische Überbeanspruchung entspricht der Ansatz der Dichtung als poröses Material nicht dem tatsächlichen Fließverhalten. Hierzu wurden weitere Laborversuche mit verschiedenen perforierten Kunststoffplatten und einem Sandboden durchgeführt. Diese Versuche sind noch nicht ausgewertet. In Bearbeitung befinden sich derzeit zudem noch Modellrechnungen, mit denen die Laborversuche numerisch modelliert werden sollen, um so die Mechanismen des Übergangs von einem Strömungskanal in den porösen Boden zu veranschaulichen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Geplanter weiterer Bearbeitungszeitraum ist bis 2015 vorgesehen.

Neben der Auswertung und Ergänzung der oben bereits genannten Laborversuche und numerischen Berechnungen soll die Entstehung von Fugen an Dichtungsanschlüssen infolge von Herstellerarbeiten (z. B. Durchrammen einer Dichtung) numerisch simuliert und in Modellversuchen untersucht werden kann. Die entsprechenden Untersuchungen wurden an die TU Hamburg-Harburg, Institut für Geotechnik, vergeben.



5 Literatur

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

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

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

Setzungen von Sanden bei Schwingungsanregung

Netzplan-Nr.: A39520570001 (alt: 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 freiem Gelände bei Rammarbeiten zeigen, dass bereits bei relativ geringen Erschütterungsgrößen mit Partikelbeschleunigungen an der Bodenoberfläche $a < 0,5 g$ Setzungen im Dezimeter-Bereich bei sandigen Böden auftreten können. Neben Setzungen wurden bei Vibrationsrammungen in standsicheren Dämmen und Uferböschungen auch Verformungen, z. T. bis zum Abreißen und Gleiten von Teilbereichen, beobachtet.

Die Umlagerungsvorgänge des Bodens bei erschütterungsintensiven Baumaßnahmen sind außerordentlich komplex und die Zahl der möglichen Einflussparameter ist groß. In der Literatur existiert eine Vielzahl von Untersuchungen zum Verhalten von Böden unter zyklischer Wechselbelastung in Elementversuchen und zum Verhalten von Bauwerksgründungen unter dem Einfluss von Erdbeben. Die Erfahrungen der BAW auf Baustellen der WSV zeigen, dass die Berechnungsverfahren aus dem „Erdbebenwesen“ auf Baumaßnahmen nicht übertragbar sind. Veröffentlichte Lösungsansätze für Setzungsprognosen zyklisch belasteter Böden basieren hauptsächlich auf Ergebnissen von Elementversuchen. Durch Feldversuche überprüfte Verfahren zur Prognose von Bauwerkssetzungen bei erschütterungsintensiven Baumaßnahmen liegen bisher nicht vor.

1.2 Bedeutung für die WSV

Schadensfälle im Umfeld von Ramm- und Verdichtungsarbeiten, die trotz Einhaltung zulässiger Schwingungsanhaltswerte der DIN 4150-3 immer wieder beobachtet werden, machen bei der Planung erschütterungsintensiver 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 deshalb weniger spürbar. Dadurch kann die Gefahr von Bauwerksschäden durch Setzungen des Baugrundes stark unterschätzt werden. Besondere Sicherheitsrelevanz hat dieses Problem bei Vibrationsrammarbeiten 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 Wechselbelastung wurden in einem größeren Frequenzbereich zyklische und dynamische Elementversuche in Ödometer- und Triaxialzellen durchgeführt. Die dynamischen Wechsellastversuche erfolgten ausschließlich unter ödometrischen Verhältnissen. Für Parameterstudien hinsichtlich des Einflusses von Bodenschwingungen auf das Tragverhalten von Zugankern wurde ein als Elementversuch konzipierter Versuchsstand aufgebaut. 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.

Im Rahmen der gutachterlichen Betreuung von Baumaßnahmen der WSV erfolgten zahlreiche Messungen von Erschütterungen und Setzungen mit dem Ziel, Baugrundverschiebungen mit Erschütterungsgrößen 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.

3 Ergebnisse

Die Parameterstudien mit Hilfe der Elementversuche zeigen, dass die Volumenänderung von Sanden maßgeblich von den Größen Lagerungsdichte, Ungleichförmigkeitsgrad, Wechsellastspannungsverhältnis und Zahl der Lastwechsel abhängt. Die statische Spannung, die Frequenz und die zeitliche Form der Axialspannungsänderung (Dauer- oder stoßartige Laständerung) haben dagegen nur einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Volumenänderungsverhalten [Zerrenthin, U., Jung, D. (2000)]. Das Tragverhalten eines Ankeres unter Schwingungsbelastung wird vor allem vom relativen Schwingweg zwischen Anker und Boden und dem Verhältnis aus statischer Zuglast zur Bruchlast bestimmt.

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 der durchgeführten Feldmessungen wurde ein empirisches Modell zur Prognose der Setzung von Flachgründungen auf locker bis mitteldicht gelagerten Sanden bei Vibrationsrammung von Spundwandelementen entwickelt. Maßgebende Eingangsgrößen sind die Lagerungsdichte und Schwinggeschwindigkeit des Bodens. Mit dem entwickelten empirischen Prognosemodell konnten bereits Setzungen eines Tunnelbauwerkes im Nahbereich von Vibrationsrammarbeiten quantitativ ausreichend genau abgeschätzt und nach der Bauausführung durch Messungen bestätigt werden [Zierach, R., Zerrenthin, U. (2009), Zerrenthin, U. (2010)]. Die Untersuchungen der TU Berlin ermöglichten keine Nachberechnung vorliegender Setzungsmessungen bei erschütterungsintensiven Baumaßnahmen mit Hilfe numerischer Verfahren [Röhner, J. (2006)].

Ein wichtiges Ergebnis in Hinblick auf eine Bestimmung von Sicherheitsabständen zu erschütterungsintensiven Baumaßnahmen ist der experimentelle Nachweis, dass auch bei sehr geringer Lagerungsdichte des Bodens unterhalb einer bestimmten Scherdehnung γ_L keine messbare Volumenänderung bzw. keine bleibende Verschiebung von Ankereslementen, auch bei einer sehr hohen Anzahl an Zyklen, auftritt. Die bei Sanden beobachtete Scherdehnungsgrenze $\gamma_L \approx 1 \cdot 10^{-5}$ bei bis zu $N = 50000$ Lastzyklen liegt in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Modell- und Feldmessungen bei Vibrationsrammungen. Damit können entsprechend den vorliegenden Bodenverhältnissen auch Anhaltswerte der Schwinggeschwindigkeit für den Baugrund angegeben werden, bei deren Unterschreitung für Flachgründungen schädliche Umlagerungen im Baugrund ausgeschlossen werden können. In der Praxis hat sich gezeigt, dass bei Einhaltung des aus der Scherdehnungsgrenze ermittelten Anhaltswertes der Bodenschwinggeschwindigkeit die Setzungsbeträge unter $S = 1$ mm bleiben.

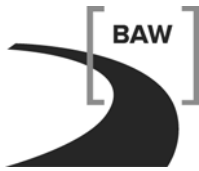
4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Zusammenfassung der Ergebnisse im Abschlussbericht

5 Literatur

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

Röhner, J. (2006): Einfluss der Schwingungsanregung durch Baumaßnahmen auf die Standsicherheit von Wasserstraßenseitendämmen. Endbericht zum Forschungsvorhaben BAW-TU Berlin, Berlin 30.11.2006 (unveröffentlicht)



- Zierach, R., Zerrenthin, U. (2009): Methoden der Baugrunddynamik im Wasserbau. BAW-Kolloquium, „Aktueller Stand und Herausforderungen der Geotechnik im Wasserbau“ am 24. September 2009 in Karlsruhe, S. 61-69
- Zerrenthin, U. (2010): Setzungen bei Rammarbeiten, Tagungsband BAW-Kolloquium „Forschung und Entwicklung im Küstenverkehrswasserbau“, 26. und 27. April 2010 in Hamburg

Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen

Netzplan-Nr.: A39520570002 (alt: A39560610020)

Projektleiter: Dipl.-Phys. 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

Statistische Aussagen für die Schwingungsausbreitung aller gängigen erschütterungsintensiven Bauverfahren an Wasserstraßen liegen bereits vor. Hierin sind enthalten Analysen für Schlagrammungen von Spundwandelementen (Dieselrammen, Hydraulikrammen, Schnellschlagbäre) und Rammpfählen (Franki-Verfahren), Vibrationsrammungen (mit variablen und starren Unwuchten im Drehzahlbereich $f = 16 - 40$ Hz), Spundwandarbeiten mit hydraulischen Pressen, Meißelarbeiten (Abriss- und Felsmeißeln), Verdichtungsarbeiten (Rüttelplatten, Rüttelwalzen, Rüttelstopfverdichtung), Auflockerungssprengungen und Abbruchsprengungen sowie Erschütterungen aus Schiffsverkehr und herab fallenden Massen.

Um die durch regelmäßige Messungen ständig wachsenden Datenbestände besser handhaben zu können, wurde eine Software für die Erfassung, Analyse, Archivierung und Prognose von Erschütterungsdaten erarbeitet. Inzwischen liegt die 10. überarbeitete Version dieser Software vor. Es sind Module für Schlagrammungen, Vibrationsrammungen, hydraulische Pressen, Meißelarbeiten, Verdichtungsarbeiten, Sprengungen sowie Erschütterungen aus Schiffsverkehr und durch 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.

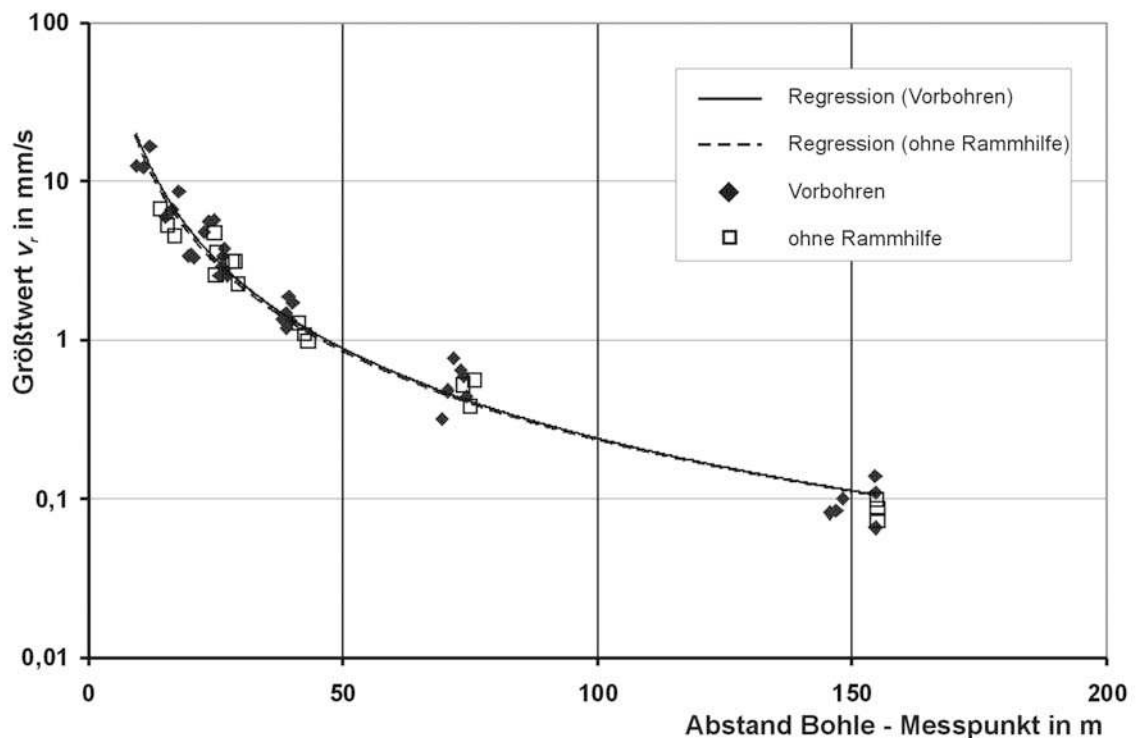


Bild 1: Größtwerte der Bodenschwingungen v_i je gerammter Spundbohle bei Vibrationsrammung

Im Jahr 2010/2011 wurden im Rahmen der Bautätigkeit des WSV sieben Proberammungen durch Schwingungsmessungen begleitet, bei denen am jeweils gleichen Standort verschiedene Rammhilfen getestet wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass unter vergleichbaren Bedingungen (Rammelemente, Boden, Rammverfahren, Abstand) die Bodenschwingungen durch die Rammhilfen Vorbohren, Hochdruckvorschneiden und Niederdruckspülung nur sehr geringfügig (vernachlässigbar) beeinflusst werden. Im Bild 1 sind exemplarisch die Größtwerte der Bodenschwinggeschwindigkeit je Messpunkt und je gerammter Bohle bei Vibrationsrammung ohne Rammhilfe und mit Rammhilfe Vorbohren bei einer Proberammung dargestellt. Die Regressionskurven (Wellenausbreitung von Oberflächenwellen) beider Verfahren liegen nahezu übereinander.

Mit den bisherigen Ergebnissen können Erschütterungsprognosen und die Auswirkungen von Erschütterungen für Planfeststellungsverfahren in vielen Fällen auch ohne kostenaufwändige Probemaßnahmen zuverlässig getätigt werden. Erschütterungsmessungen bei Bau- und Probemaßnahmen können mit Hilfe der entwickelten Software bereits vor Ort vorausgewertet werden so dass auf Anfragen von Ämtern zu Erschütterungsproblemen inzwischen wesentlich kurzfristiger reagiert werden kann.

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.

Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen

Netzplan-Nr.: A39530110036

Projektleiter: Dr.-Ing. M. Schröder, Abt. 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, sind die Verhältnisse im Fall von über- und durchströmter Vegetation, die man außerhalb des Mittelwasserbettes im Bereich der Vorländer antrifft, wesentlich komplexer. Dies wird besonders deutlich an speziellen Eigenschaften von Pflanzen, wie Flexibilität unter Strömungsbelastung oder jahreszeitliche Veränderung der Belaubung. Darüber hinaus müssen für den Fall durchströmter Vegetation grundsätzlich andere Gleichungen als für den Fall überströmter Vegetation verwendet werden, da der Strömungswiderstand im ersten Fall mit steigendem Abfluss zunimmt, während er im zweiten Fall abnimmt.

In den 80er-Jahren des 20. Jahrhunderts wurden im Rahmen eines DFG-Schwerpunktprogramms umfangreiche Forschungen initiiert, die sich genau mit diesem Problem – dem Strömungswiderstand von durchströmter Vegetation – befassten. Die Ergebnisse der Forschung mündeten in dem DVWK-Merkblatt 220 („Hydraulische Berechnung von Fließgewässern“, 1991). Mit dem Abschluss des DFG-Schwerpunktprogramms wurden aufgrund der bereits angesprochenen Komplexität des Themas bei Weitem nicht alle Forschungsziele erreicht, so dass sich bis heute zahlreiche Forschungsarbeiten mit dem Strömungswiderstand von Pflanzen beschäftigen. Hierbei stehen häufig Teilaspekte im Vordergrund, wie Flexibilität von Pflanzen oder neue Berechnungsansätze für über- und durchströmten Bewuchs, während sich andere Arbeiten mit der Katalogisierung von Vegetationsformen und deren Fließwiderstandsverhalten sowie mit der Erfassung von Bewuchsformen mithilfe der Fernerkundung beschäftigen.

1.2 Bedeutung für die WSV

In der Planung und Durchführung von Unterhaltungs- und Ausbaumaßnahmen an den frei fließenden und staugeregelten Bundeswasserstraßen sowie bei der Bewertung von Baumaßnahmen Dritter sind auch immer Hochwasserabflüsse zu betrachten, bei denen häufig dicht bewaldete Vorlandflächen das Abflussgeschehen dominieren. Die möglichst genaue rechnerische Berücksichtigung des Strömungswiderstands der Vegetation über ein weites Spektrum von Abflusszuständen ist bedeutend für die Ermittlung von Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten und folglich für die Abschätzung von morphodynamischen Prozessen (Geschiebetransport, Sohlstabilität und Fehlstellenentwicklung). Insbesondere in den folgenden drei Situationen ist die Verwendung von physikalisch-wissenschaftlich fundierten Berechnungsansätzen zur Ermittlung des Strömungswiderstands von Pflanzen zwingend erforderlich:

- Die Kalibrierung eines Strömungsmodells erfordert für den Lastfall Hochwasserabfluss auch entsprechende Naturmessdaten. Im Bereich von extremen Hochwasserabflüssen sind allerdings Naturmessdaten nur spärlich oder überhaupt nicht verfügbar, so dass häufig mit dem bei niedrigeren Abflüssen kalibrierten Strömungsmodell eine Extrapolation auf extreme Hochwasserstände erfolgen muss.
- Bei der instationären Strömungsmodellierung einer Hochwasserganglinie variiert der Strömungswiderstand von durch- und überströmter Vegetation in einem sehr weiten Bereich und kann mit konstanten Beiwerten der einfachen Fließgesetze nach Manning-Strickler, Nikuradse usw. nicht mehr beschrieben werden.

- Die planerischen Maßnahmen Dritter, die beispielsweise als Ausgleichsmaßnahmen im Vorlandbereich durchgeführt werden sollen, sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf die Belange der Schifffahrt sowie der Gewässerunterhaltung zu bewerten. Solche Maßnahmen haben häufig den Hochwasserschutz oder ökologische Aufwertungen zum Ziel (z. B. Veränderung des Hochwasserquerschnitts durch die Rückverlegung von Deichen oder Anbindung von nicht durchströmten Altarmen bzw. Anpflanzung oder Tolerierung einer auetypischen Vegetation). Eine Kalibrierung von Rauheitsparametern zur Beschreibung des Strömungswiderstands von Vegetation ist bei planerischen Maßnahmen vom Grundsatz her nicht möglich.

1.3 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 und Hochschulen. Durch eigene Aufträge an Forschungseinrichtungen wird die Durchführung von Modellversuchen in Wasserbaulaboratorien und von Naturversuchen im Bereich der Bundeswasserstraßen vergeben. Mit diesen Forschungsergebnissen erhält die BAW eine Datengrundlage, die unmittelbar zur weiteren Qualifizierung der eigenen Modellverfahren eingesetzt werden kann.

3 Ergebnisse

Die Kooperation mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen und dem Aachener Ingenieurbüro *valitec simulations* wurde im Jahr 2011 fortgeführt. Nur am 12. Januar 2011 bot der Niederrhein ausreichend hohe Wasserstände, die es erlaubten ADCP-Messungen durchzuführen. An diesem Tag erfolgten die Messungen im Bereich des linken Vorlands bei Perrich unterhalb von Wesel (Rhein-km 817,2). Mit einem Abfluss von rd. 8500 m³/s waren an diesem Tag höhere Wasserstände zu beobachten, als bei den früheren ADCP-Messungen in diesem Bereich, so dass die angestrebte Ergänzung der bestehenden Datenbasis durch höhere Abflüsse erreicht wurde.

Bild 1 oben wurde während der Messkampagne in Perrich aufgenommen. In Bild 1 unten sind die aufgenommenen ADCP-Messfahrten in das aktuelle Luftbild aus diesem Bereich eingezeichnet.

Tabelle 1: Überblick über die im Jahr 2011 durchgeführten Arbeiten

| Datum | Ort | Messgröße | Abfluss [m ³ /s] |
|------------|---------|--------------------------------------|-----------------------------|
| 12.01.2011 | Perrich | Fließgeschwindigkeit, ADCP-Messungen | 8534,0 |

In der Zusammenarbeit mit der BfG wurde 2011 von der BfG ein Forschungsprojekt gestartet, um die Möglichkeiten der Vegetationserfassung aus Fernerkundungsdaten (LIDAR und Infrarotbilder) zu er-

proben (Automatisierte Ableitung von Vorlandrauheiten für hydrodynamische Modellierungen auf der Basis von flugzeuggestützten Fernerkundungsdaten). Neben der BAW sind die beiden Institute des KIT Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) und Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) in dieses Forschungsprojekt eingebunden.

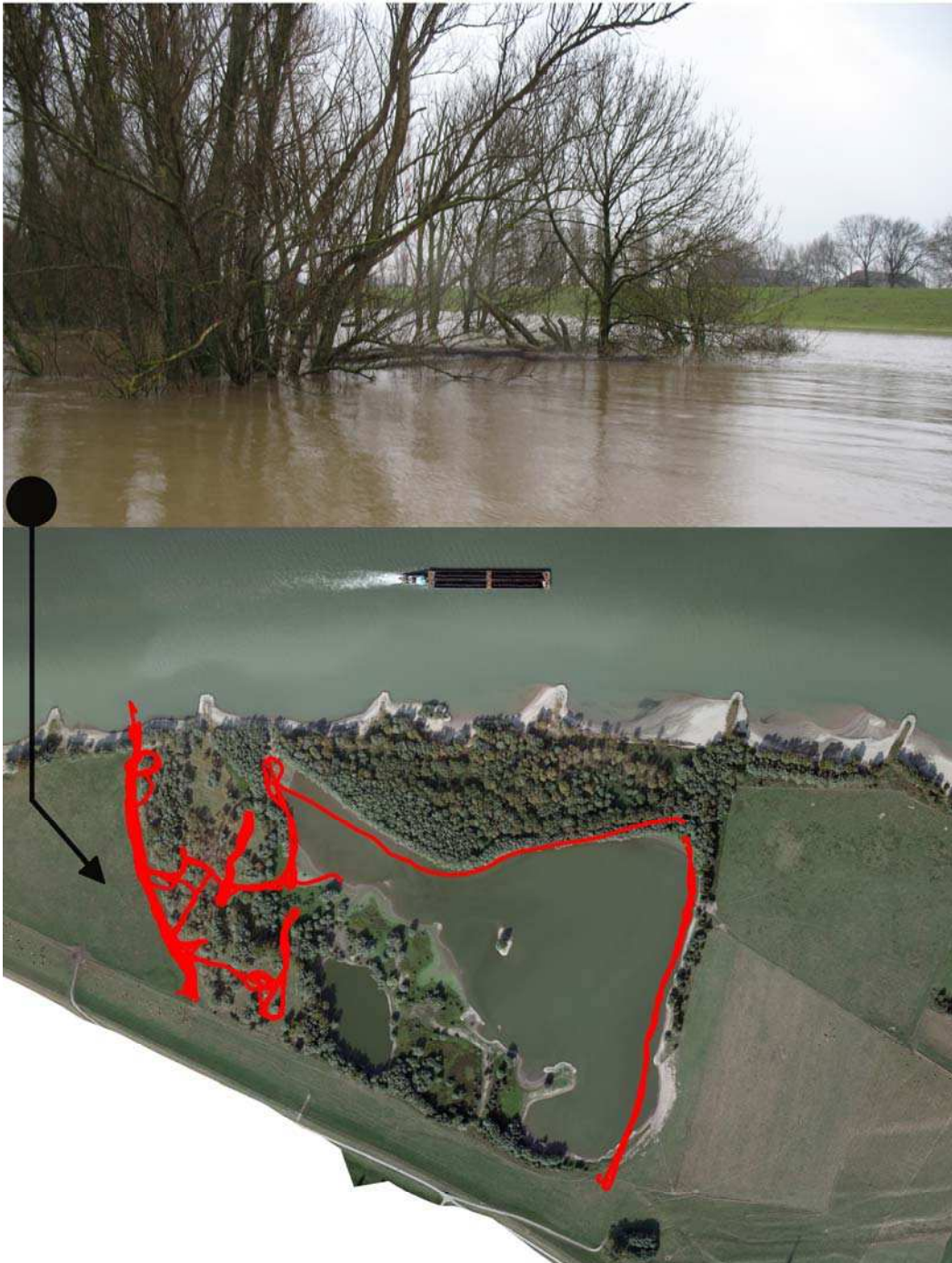
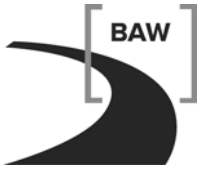


Bild 1: Foto aus dem Bereich Perrich / Wesel (Rhein-km 817) und Luftbild mit Messbootfahrten während der ADCP-Messungen am 12. Januar 2012



4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2012: Fortführung der Kooperation mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen sowie dem Aachener Ingenieurbüro *valitec simulations* zur Durchführung von Hochwassermessungen. Umfassende Auswertung aller vorliegenden Messdaten und Untersuchungen. Projektabschluss.
- 2013: Fortführung der Kooperation mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referate M5 Geodäsie und U3 Vegetationskunde, um die Eignung von Fernerkundungsmethoden (Infrarot-Luftbilder und LIDAR) zur Erfassung von Vegetation zu evaluieren.

Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau

Netzplan-Nr.: A39530110064

Projektleiterin: Dr.-Ing. R. Kopmann, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

E-Mail: rebekka.kopmann@baw.de

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

Bei den durch die BAW durchgeführten Untersuchungen zur Wirkungsweise flussbaulicher Maßnahmen muss zunehmend die morphodynamische Flussentwicklung einbezogen werden. Mehrdimensionale numerische Feststofftransport-Modelle (FT-Modelle) finden zunehmend Anwendung zur Lösung von instationären, großskaligen Problemen, da sie bereits einen beachtlichen Entwicklungsstand erreicht haben. Allerdings setzt eine erfolgreiche Anwendung dieser Verfahren ein grundlegendes Verständnis der physikalischen Phänomene sowie große Erfahrung in der numerischen Modellierung voraus. Dies ist bedingt durch die Vielfalt und enorme Komplexität der morphodynamischen Phänomene (insbesondere durch Rückkopplungsprozesse zwischen Strömung und sich umlagernder Sohle) und durch deren phänomenspezifische Beschreibung mittels semi-empirischer Gleichungen. Während die Überprüfung von rein hydrodynamischen Modellsystemen an analytischen Lösungen durchgeführt werden kann, fehlen diese für komplexere morphodynamische Prozesse. Die Zuverlässigkeit dieser Modellklasse ist daher an die Verifikation und Validierung durch Fallstudien und an die Erfahrung des Programmentwicklers und -anwenders gebunden. Verifikation, Validierung und Kalibrierung der Modelle müssen daher sehr sorgfältig und ausführlich durchgeführt werden. Für die BAW ist der Nachweis der Anwendbarkeit und der Grenzen für die praxisrelevanten Fragestellungen zu erbringen. Zentral ist dabei die Frage, mit welcher Sicherheit FT-Modelle bei welchen Fragestellungen zur Prognose von Sohlentwicklungen eingesetzt werden können.

1.2 Bedeutung für die WSV

Der Einsatz von prognosesicheren, auf die Fragestellungen der WSV zugeschnittenen FT-Modellen sichert die effiziente und qualitativ hochwertige Bearbeitung von Projekten mit morphodynamischen Fragestellungen. Als Ergänzung zu Naturuntersuchungen und gegenständlichen Modellen ist dieses Werkzeug optimal geeignet, die räumliche und zeitliche Wirkung vieler verschiedener Einflussgrößen mittels Szenarienrechnungen aufzuzeigen. Dies ist insbesondere im Zusammenhang mit Langzeitprognosen hilfreich und verbessert die Bewertung von Maßnahmen und deren Qualitätskontrolle.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel des Projektes ist es, die Eignung numerischer FT-Modelle zur Abbildung grundlegender morphologischer Prozesse anhand von Messungen aus Labormodellen zu beurteilen. Als Ergebnis werden Weiterentwicklungspotenziale sowie eine beschleunigte Einführung dieser Modelle im Rahmen der Projektarbeit erwartet. Dafür werden folgenden Untersuchungsschwerpunkte verfolgt:

- Untersuchungen an Labormodellen mit beweglicher Sohle für die Herstellung von geeigneten Messdatensätzen zur Standard-Verifikation von FT-Modellen.
- Validierung bestehender FT-Modelle anhand geeigneter Messdatensätze. Ziel ist es, die Anwendbarkeit und Grenzen der Modelle aufzuzeigen. Dazu gehört auch die Einschätzung der erreichten Genauigkeit mit Methoden der Wahrscheinlichkeitsrechnung.
- Weiterentwicklung bestehender FT-Modelle in Zusammenarbeit mit Universitäten.

2 Untersuchungsmethoden

Im Jahr 2011 wurde die Bewertung von Simulationsergebnissen mittels Zuverlässigkeitsanalyse weiterverfolgt. Die vom Fraunhofer-Institut für Algorithmen und Wissenschaftliches Rechnen (SCAI) entwickelten Methoden Monte Carlo CL und RBF-Metamodellierung wurden an Projektdaten getestet. Die für die First Order Reliability Methode verwendete automatische Differenzierung mittels eines speziel-

len Compilers hat das Institut „Software and Tools for Computational Engineering“ der RWTH Aachen in der adjungierten Form realisiert. Mit dieser Rückwärts-Differenzierung können Optimierungsprobleme gelöst werden, wie z. B. die Kalibrierung der Rauheitswerte oder das Setzen von geeigneten Anfangswerten.

Die Validierung und Weiterentwicklung von numerischen Modellen wurden in diesem Jahr in drei Teilprojekten vorangetrieben:

1. Anhand von Laboruntersuchungen an einer 80 m langen Rinne mit fester Sohle mit und ohne Buhnen wurden die beiden mehrdimensionalen Simulationsverfahren TELEMAC und UnTRIM validiert. Die numerischen Simulationen wurden begleitend zu den Rinnenmessungen in der BAW im Rahmen einer Vergabe durchgeführt.
2. Aufbauend auf einer Diplomarbeit [Goll, A. 2011] wurden die Untersuchungen zur Abbildung von Dünen mit numerischen mehrdimensionalen morphodynamischen Modellen im Rahmen einer FuE-Stelle weitergeführt. Als Vergleich wurden hierfür die Messergebnisse aus der 5m-Systemrinne herangezogen.
3. Im Rahmen einer Kooperation mit der EDF wurde ein neues Mehrschichtenmodell für das Geschiebetransportmodell in dem Modul Sisyphe des Programmpaketes TELEMAC entwickelt und anhand von zwei Testfällen validiert. Detaillierte Ausführungen finden sich in [Merkel, U., Kopmann, R., 2011].

3 Ergebnisse

Der 60 km lange Rheinabschnitt zwischen Iffezheim und Speyer wurde mit dem Programmpaket TELEMAC unter Berücksichtigung von Bagger- und Verklappaktivitäten über einen Zeitraum von 10 Jahren kalibriert [Brudy-Zippelius, T., Weichert, R., 2010]. Für die morphologischen Berechnungen wurde eine Zuverlässigkeitsanalyse mittels der Scatter Analyse, der MC-CL Methode und der Metamodellierung erstellt. Dafür wurden 9 Eingabeparameter mit Schwankungsbreiten belegt und insgesamt 319 Simulationen für einen Zeitraum von 18 Monaten bis 10 Jahren durchgeführt. Eine wesentliche Erkenntnis aus dieser Untersuchung ist die zeitliche Entwicklung des Vertrauensintervalls. Entgegen der Befürchtung, dass die Unsicherheiten der Modellergebnisse stetig größer werden, kann für bestimmte Bereiche gezeigt werden, dass der mittlere Wert des Vertrauensintervalls um einen Wert schwankt (siehe Bild 1).

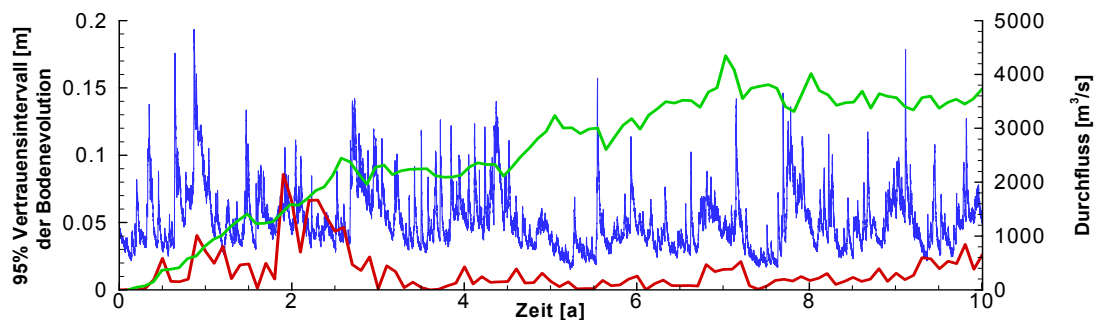


Bild 1: 95% Vertrauensintervall der Bodenevolution bezüglich des Rauheitskoeffizienten im Flussschlauch berechnet mit der Scatter Analyse über 10 Jahre (rot: repräsentativer Punkt im Flussschlauch, grün: mittlerer Wert im Flussschlauch ohne Verklappbereiche)

1. Erste Ergebnisse der numerischen Validierung von Strömungen an um- und überströmten Buhnen mit dem Programm TELEMAC sind vielversprechend. Die Wasserspiegel und Geschwindigkeitsverteilungen können bei entsprechender Parameterwahl sehr genau abgebildet werden (Bild 3). Aus dem Vergleich der verschiedenen Einstellungen, wie z. B. Turbulenzmodelle, ergeben sich wichtige Hinweise für die Genauigkeit der Ergebnisse in den Projekten.

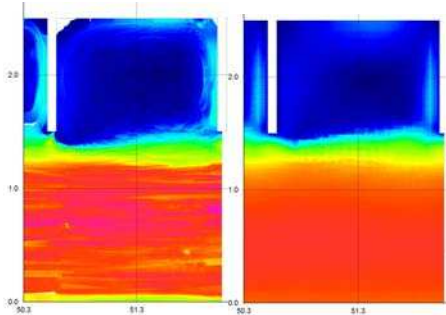


Bild 2: Vergleich der gemessenen (links) und numerisch simulierten (rechts) Oberflächengeschwindigkeiten für eine Rinnenströmung mit umströmten Buhnen (blau:0m/s - lila: 0,32 m/s)

2. Verschiedene Dünenzenarien in einer Laborrinne der BAW mit und ohne Buhnen wurden numerisch simuliert. Hierbei zeigte sich, dass eine Vorhersage von Dünen ohne Anpassung der Parameter derzeit noch nicht befriedigend durchgeführt werden kann. Das Parameterset, das zu einer guten Abbildung der Dünen in der Rinne ohne Buhnen führt, lässt sich nicht einfach auf die Rinne mit Buhnen übertragen. Nichtsdestotrotz sind die Dünen im numerischen Modell bezüglich Dünenhöhen und -längen, sowie Form und Dreidimensionalität schon gut vergleichbar. Exemplarisch sind in Bild 2 die numerischen Ergebnisse den Messungen gegenübergestellt. Detaillierte Ergebnisse finden sich in [Goll, A., Kopmann, R., 2011].

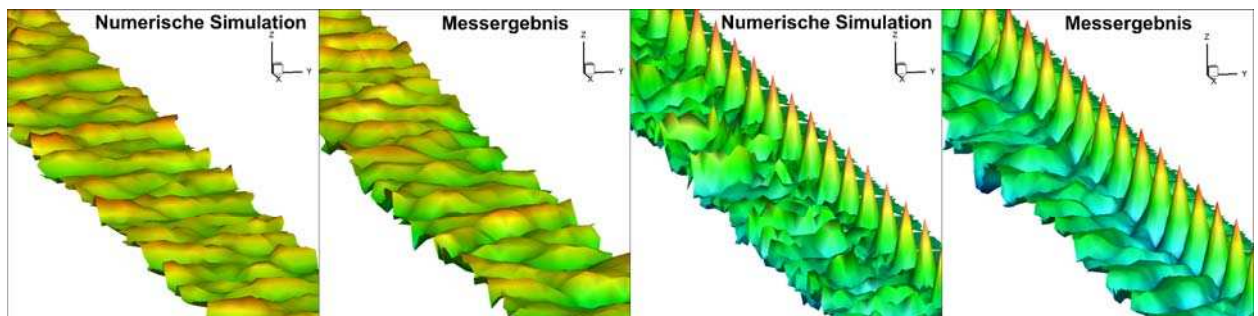


Bild 3: Vergleich einer gemessenen und numerisch simulierten Dünensohle nach 18 h mit (rechts) und ohne (links) Buhnen (Darstellung überhöht, Buhnen abstrahiert)

3. Die Entwicklungen des neuen Layerkonzepts zeigen vielversprechende Ergebnisse an zwei Rinnenbeispielen. Im Gegensatz zu dem herkömmlichen Konzept können die vertikalen Sedimentschichtungen auch über längere Simulationszeiträume aufgebaut und erhalten werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Entsprechend der genannten Untersuchungsschwerpunkte werden die folgenden Arbeitsschritte verfolgt:

- Erstellung von Validierungsdatensätzen in den Systemrinnen für zentrale flussbauliche Phänomene (Transportkörper, Wirkung von Strombauwerken und Gewässerberandung auf die Flusssohle)
- Erstellung eines Anwenderhandbuchs zum Einsatz von Methoden zur Zuverlässigkeitsanalyse für numerische Modelle zur Strömungs- und Sedimenttransportmodellierung im Flussbau
- Weiterentwicklung der automatischen Differenzierung zur Zuverlässigkeitsanalyse für den parallelen adjungierten Modus
- Anwendung der automatischen Differenzierung auf ein Projektbeispiel
- Validierung der bestehenden FT-Modelle anhand von Validierungsdatensätzen
- Weiterentwicklung der FT-Modelle aufgrund der Validierungsergebnisse

Das Vorhaben wird in 2012 abgeschlossen.

5 Literatur

- Brudy-Zippelius, T., Weichert, R. (2010): Optimierung der hydraulisch-morphologischen Situation am Oberrhein – Einsatz eines 2D Feststofftransportmodells, 15. Gemeinschafts-Symposium der Wasserbau-Institute TU München, TU Graz, ETH Zürich
- Goll, A. (2011): Numerische Modellierung von Geschiebetransport durch Dünen, Diplomarbeit Universität Stuttgart
- Goll, A., Kopmann, R. (2011): Modelling of bed forms (dunes) with Telemac 3D and Sisyphe, Telemac Users Club, Chatou, 19.-21.10.2011, pp 16-21
- Merkel, U., Kopmann, R. (2011): A continuous sediment layer concept for Sisyphe, Telemac Users Club, Chatou, 19.-21.10.2011, pp. 105-110
- Richter, K. (2011): Physikalische Modellversuche zur Auswirkung von Kerbbuhnen auf die Morphologie und den Geschiebetransport des Flussschlauchs, Diplomarbeit Technische Uni Kaiserslautern

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

Netzplan-Nr.: A39530170001

Projektleiter: Dr.-Ing. M. Schröder; Dr.-Ing. S. Wurms (Bearbeiter), Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Referat 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 freifließenden Binnenwasserstraßen Rhein, Donau, Elbe und Oder. Während die Schifffahrt erst bei Hochwasserabflüssen über dem sogenannten *Höchsten Schiffbaren Wasserstand* (entspricht der HW Marke II) eingestellt wird, ist bei extremen Niedrigwasserabflüssen eine zunehmende Beeinträchtigung festzustellen, wie dies beispielsweise während des Niedrigwassers 2003 zu beobachten war. Einerseits reduziert sich in solchen Fällen die maximal mögliche Abladetiefe, was unmittelbare Folgen für die Wirtschaftlichkeit des Transports per Schiff hat. Andererseits kommt es aber auch zu Breitereinschränkungen in der Fahrrinne, die bei Wasserständen unter dem heutigen Niedrigwasserausbau durch Untiefen in der Fahrrinne verursacht werden. Betroffen hiervon wäre vor allem die Sicherheit und Leichtigkeit, mit der die Schifffahrt dann noch in Engpassbereichen zu navigieren vermag.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Zur Identifikation von Anpassungsmaßnahmen 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.

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 (WSV) frühzeitig Anpassungsoptionen als Antwort auf die Auswirkungen eines möglichen Klimawandels zur Verfügung, mit welchen die Leistungsfähigkeit des Transportträgers Binnenschifffahrt auch bei extremen Niedrigwasserabflüssen erhalten werden kann. Zudem finden bereits heute Erkenntnisse, welche aus den Modelluntersuchungen resultieren, Eingang in ein aktuelles WSV-Projekt am Mittelrhein.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel dieses Projektes ist es, mögliche wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Maßnahmen zu identifizieren und zu bewerten, mit denen in Niedrigwasserperioden Mindestfließtiefen in freifließenden Wasserstraßen über längere Zeiträume als heute garantiert werden können. Im Rahmen dieses Pro-

jekt es 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 Schwachstellen aufbauend werden erforderliche Ausbaumaßnahmen konzipiert und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Abschließend ist der Unterhaltungs- und Regelungsaufwand hinsichtlich des Gewinns für die Schifffahrt als Grundlage für eine 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. Das Untersuchungsprogramm gliedert sich in zwei Abschnitte: Analyse des heutigen Ausbaustandes der Wasserstraßen sowie Planung und Bewertung verschiedener Optionen eines Niedrigwasserausbaus. Mit Hilfe des 2D-hydro-/morphodynamischen Modellierungssystems TELEMAC-2D/SISYPHE erfolgt zunächst die Analyse des heutigen Niedrigwasserausbaus. Da derzeit noch keine belastbaren Abflussprojektionen für den betrachteten Zeitraum bis 2100 vorliegen, erfolgt eine hydrodynamische Untersuchung für unterschiedliche Niedrigwasserzustände im Bereich von GIQ - 5% bis GIQ - 25%. Der heutige Niedrigwasserausbau stellt keinen statischen, sich selbst erhaltenden Gewässerzustand dar, sondern erfordert einen kontinuierlichen Unterhaltungsaufwand. Im Rahmen morphodynamischer Modellrechnungen soll die Sohlentwicklung sowie der zukünftige Unterhaltungsaufwand in Form jährlicher Bagger- und Geschiebezugabemengen zum Erhalt des Status quo der Wasserstraße zunächst für ein Null-Szenario ohne Klimaänderungen abgeschätzt werden. 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. Die Lage dieser abgestuft vertieften Fahrerinne wird im Rahmen des KLIWAS-Projekts 4.04 „Ermittlung von Fahrrinnenmindestbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt“ ermittelt. Mit dieser bautechnischen Variante werden hydro- und morphodynamische Berechnungen durchgeführt. 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 Niedrigwasserfahrerinne zu vermeiden und deren Unterhaltungsaufwand zu minimieren. Mögliche Regelungsmaßnahmen, die aus heutiger Sicht geeignet sein könnten, die gestellten Anforderungen zu erfüllen, sind neben den üblichen Regelungsbauwerken Buhnen und Parallelwerke temporär wirkende Buhnen und Schwellen bzw. Sohlgleiten. Für die morphodynamischen Langzeitsimulationen sind verschiedene Klimaszenarien beginnend mit dem Null-Szenario durchzuführen.

3 Ergebnisse

Die Untersuchung der hydraulischen Größen innerhalb der Fahrerinne bei bestehenden Niedrigwasserbedingungen (GIQ₂₀₀₂) sowie reduzierten Niedrigwasserabflüssen zeigt, dass im Modellbereich im Falle sinkender Niedrigwasserabflüsse ein erhebliches Anwachsen von geometrischen Engpassstellen zu erwarten ist. Während eine moderate Abnahme der Niedrigwasserabflüsse noch durch bereichsweise vorhandene Tiefenreserven innerhalb der Fahrerinne gepuffert wird, treten ab einer Reduktion des GIQ um ca. 15 % eine Vielzahl neuer Fehlstellen innerhalb der Fahrerinne auf. Den größten Anteil am Gesamtvolumen der Fehlstellen haben die Mittelgründe, welche in Abhängigkeit der Reduktion der Niedrigwasserabflüsse mitunter über die gesamte Fahrrinnenbreite in den Fahrrinnenkasten ragen und damit eine erhebliche Beeinträchtigung für die Binnenschifffahrt darstellen. Die große Anzahl der zu erwartenden Fehlstellen unterstreicht die Wirtschaftlichkeit des Konzeptes einer abgestuft vertieften Fahrerinne.

Hydrodynamische Untersuchungen belegen die positive Wirkung der abgestuften Vertiefung der Fahrrinne auf eingeschränkter Breite auf eine Solltiefe von 2,10 m unter dem Wasserspiegel, welcher sich bei GIQ -25 % einstellt, zuzüglich 0,1 m Baggertoleranz. Hierdurch kann im gesamten Untersuchungsbereich die Fahrwassertiefe von 2,10 m bei GIQ -25% erreicht werden, da lokal auftretende Absenkungen der Wasserspiegellagen bei genanntem Abfluss im Maximum 0,02 m betragen. In den unmittelbaren Vertiefungsbereichen treten leicht reduzierte Schubspannungen auf, wodurch die Anlandungstendenz in den zur Umsetzung der abgestuften Vertiefung erforderlichen Baggerbereichen etwas erhöht wird. Langfristig ist jedoch eine Minimierung des Unterhaltungsaufwandes anzustreben. Ergänzend zur Vertiefung der Fahrrinne, sofern diese in dynamischen Bereichen wiederkehrender Anlandungen erfolgt, ist daher unter wirtschaftlichen Aspekten der Einsatz von Regelungsbauwerken zur Erhöhung der Schubspannungen in den Vertiefungsbereichen zu untersuchen.

Im Fall reduzierter Niedrigwasserabflüsse sind es insbesondere die Bereiche der bereits unter heutigen Abflussbedingungen wiederkehrenden Anlandungen, in welchen Beeinträchtigungen der Schifffahrt auftreten. Zur Verbesserung dieses Umstands können entweder als alleinige Maßnahme innerhalb solcher Bereiche oder in Ergänzung zur abgestuft vertieften Fahrrinne jene Regelungsmaßnahmen beitragen, die auf eine Erhöhung der Schubspannung innerhalb der maßgeblichen Anlandungsbereiche abzielen und somit die Anlandungsraten verringern. In welchen Bereichen der Fahrrinne vor dem Hintergrund der Verkehrssicherung relevante, wiederkehrende Anlandungen auftreten, kann der Baggerhistorie eines jeden Streckenabschnitts entnommen werden. Innerhalb der Pilotstrecke wurden Regelungsmaßnahmen zur Reduzierung der Anlandungstendenzen und damit des Unterhaltungsaufwands für die Bereiche Oestrich, Rüdeshheimer Aue, Bacharacher Werth sowie Jungferngrund erarbeitet, da hier eine Überlagerung von ständig wiederkehrenden Anlandungen - belegt durch die Baggerhistorie - mit den größten zur Umsetzung der abgestuft vertieften Fahrrinne erforderlichen Baggermengen auftritt.

Konventionelle, statische Regelungsbauwerke wie Buhnen oder Leitwerke kommen zur Erhöhung der Fahrwassertiefe dann in Frage, wenn durch sie weder eine Erhöhung der Wasserspiegellagen bei Hochwasserabflüssen induziert, noch die Schifffahrt behindert wird. Sollte dies nicht der Fall sein, so könnten flexible Regelungselemente in den genannten Situationen Abhilfe schaffen. Deren Wirkung entfaltet sich lediglich in einem begrenzten Abflussspektrum, im konkreten Fall z. B. während der temporären Stützung des Wasserspiegels in Niedrigwasserperioden. Ein weiterer Vorteil flexibler, temporär wirkender gegenüber statischer Regelungsmaßnahmen wäre, dass die Morphodynamik im Umfeld der Regelungsmaßnahme durch die auf Niedrigwasserabflüsse begrenzte Wirkung nur geringfügig beeinflusst würde.

Sind Streckenabschnitte, welche unter reduzierten Niedrigwasserabflussbedingungen Fehltiefen innerhalb der Fahrrinne aufweisen, oberstrom einer Stromverzweigung lokalisiert, so bietet sich zur Stützung der Wasserspiegellagen aus hydraulischer Sicht die temporäre Abtrennung des Seitenarmes der Verzweigung an. Bild 1 zeigt beispielhaft für den Bereich des Bacharacher Werths den Anstieg des Wasserspiegels infolge einer vollständigen Absperrung des Seitenarmes (Kauber Wasser) bei extremem Niedrigwasserabfluss (GIQ -25 %). Durch die temporäre Absperrung des Seitenarms könnte ein maximaler Tiefengewinn in der Fahrrinne von bis zu 0,3 m und von etwa 0,14 m noch 1,4 km stromauf, im Bereich eines bei Niedrigwasser maßgeblichen Tiefenengpasses, erzielt werden. Zur Feststellung der konstruktiven Machbarkeit solch eines gegebenenfalls nur bei entsprechenden Niedrigwassersituationen wirksam werdenden Absperrbauwerks bedarf es jedoch weitergehender grundsätzlicher Untersuchungen.

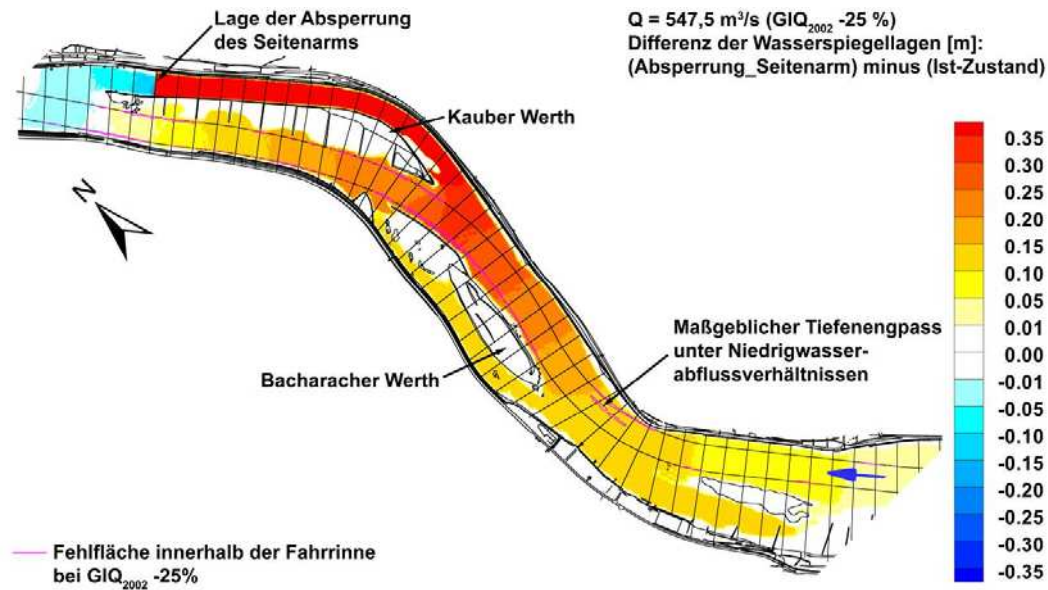


Bild 1: Wirkung einer vollständigen Absperrung des Seitenarms einer Stromverzweigung auf die Wasserspiegellage bei extremem Niedrigwasserabfluss

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

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

- Untersuchung weiterer baulicher Maßnahmen inkl. der abgestuft vertieften Fahrrinne zur Gewährleistung von Mindestfließtiefen bei reduzierten Niedrigwasserabflüssen,
- Kalibrierung des 2D-morphodynamischen Modells, Abschätzung des Unterhaltungsaufwandes im Ist-Zustand sowie Ermittlung von Unterhaltungsstrategien im Planungszustand,
- Bewertung der einzelnen Ausbauvarianten und
- qualitative Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Abschnitte der Wasserstraße.

Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen - Passierbarkeit

Netzplan-Nr.: A39530170002

Projektleiter: Dr. sc. tech. R. Weichert, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,
Referat Flusssysteme I (W1)

E-Mail: roman.weichert@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit der Fließgewässer ist ein zentral erklärtes Ziel der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (2000). In diesem Zusammenhang besteht bei zahlreichen Wehr- und Stauanlagen, welche zur Gewährleistung der Schifffahrt und/oder zur Nutzung der Wasserkraft errichtet wurden, die Notwendigkeit zur Ergänzung von funktionsfähigen technischen Fischaufstiegsanlagen. Eine Fischaufstiegsanlage kann dann als funktionstüchtig betrachtet werden, wenn sie für die große Mehrzahl der für die betrachtete Fließgewässerregion relevanten Fischarten durchgängig ist. Den Begriff der Durchgängigkeit in diesem Zusammenhang zu definieren und ggf. mit Quantitäten aufwandernder Fische zu belegen, ist jedoch aufgrund bestehender Wissensdefizite der extrem komplexen biologischen Zusammenhänge derzeit nicht möglich. Es wird daher auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, die letztendlich in technische Bemessungsregeln für den Bau von Fischaufstiegsanlagen münden. Ziel dieser Bemessung ist die Erzeugung einer Strömungssituation, die es den Fischen ermöglicht, ein vorhandenes Querbauwerk zu überwinden. Aufgrund der sehr variablen Anforderungen je nach Art und Entwicklungsstadium des Fisches ist dabei die Herstellung der Durchgängigkeit für die ganze Bandbreite der zu erwartenden Fischzönose nur schwierig möglich.

Bei Planung und Bau von technischen Fischaufstiegsanlagen existieren bereits umfassende Erfahrungen vor allem für kleine und mittlere Fließgewässer. Diese sind in entsprechenden Regelwerken zusammengefasst. Bei der Übertragung des Stands der Technik auf die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen existieren jedoch Unsicherheiten.

1.2 Bedeutung für die WSV

Das seit dem 1. März 2010 geltende Gesetz zur Neuregelung des Wasserrechts (WHG) verpflichtet die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) zur Erhaltung oder Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an den Staustufen, die von ihr errichtet oder betrieben werden, soweit dies für die Erreichung der Ziele der europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL 2000) erforderlich ist. Gemäß § 34 WHG (Durchgängigkeit oberirdischer Gewässer) ist bei Errichtung, wesentlicher Änderung oder Betrieb einer Staustufe durch geeignete Einrichtungen und Betriebsweisen die Durchgängigkeit des Gewässers zu erhalten oder wiederherzustellen. Bestehende Anlagen sind nachzurüsten. Bei Staustufen an Bundeswasserstraßen, die von der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes errichtet oder betrieben werden, führt diese die erforderlichen Maßnahmen im Rahmen ihrer Aufgaben nach dem WaStrG hoheitlich durch.

Da die überwiegende Anzahl der WSV-Staustufen über keine ausreichend funktionsfähigen Anlagen verfügen, die die Fischwanderung und damit die Durchwanderbarkeit der Bundeswasserstraßen gewährleisten, wird an einer Vielzahl der Staustufen der Bau von Fischwechsellanlagen bzw. deren Erhaltung erforderlich. Dabei sind nach derzeitigem Wissensstand in der Regel für Fischaufstieg und Fischabstieg jeweils unterschiedliche Anlagen erforderlich, da das Fischverhalten im Aufstiegsfall ein deutlich anderes ist als im Abstiegsfall. Grundsätzlich ist an jeder Staustufe mindestens eine Fischaufstiegsanlage notwendig.

Es besteht demnach in der WSV ein großer Bedarf, die vorhandenen Erfahrungen bei Fischaufstiegsanlagen für die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen zu prüfen und weiterzuentwickeln.

1.3 Untersuchungsziel

Die hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen kann in die Problemfelder Auffindbarkeit und Passierbarkeit unterteilt werden. Während sich das Thema „Auffindbarkeit“ damit beschäftigt, welche Bedingungen vorherrschen müssen, damit die Fische den Weg in die Fischaufstiegsanlage finden, werden beim Thema „Passierbarkeit“ die Verhältnisse in der eigentlichen Fischaufstiegsanlage betrachtet.

Das vorliegende FuE-Projekt beschäftigt sich mit dem Themenfeld „Passierbarkeit“. Es hat zum Ziel, allgemeingültige, objektunabhängige ökohydraulisch-physikalische Gesetzmäßigkeiten als quantitative Handreichung zur Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen zu erarbeiten. Längerfristiges Untersuchungsziel ist, diesen Erkenntnisgewinn für alle an Bundeswasserstraßen relevanten Bautypen von Fischaufstiegsanlagen zu erarbeiten. In einem ersten Schritt wird zunächst der Schlitzpass näher betrachtet, da dieser der am häufigsten eingesetzte Bautyp ist.

2 Untersuchungsmethoden

Für die Untersuchungen zur hydraulischen Dimensionierung einer Fischaufstiegsanlage vom Typ „Schlitzpass“ wurde ein physikalisches Modell im Maßstab 1:4,1 für die Verhältnisse der Fischaufstiegsanlagen am Neckar aufgebaut. Das Modell besteht aus neun aufeinander folgenden Becken, die durch eine Breite von 0,74 m, eine Länge von 0,99 m und eine Sohlneigung von 2,8% gekennzeichnet sind. Die Bauelemente der Becken sind dabei für Untersuchungen mehrerer geometrischer Varianten ausgelegt, d. h. die Beckengeometrie ist flexibel anpassbar.

Die Strömung innerhalb eines einzelnen Beckens und im Bereich des Schlitzes, welcher benachbarte Becken verbindet, soll vermessen und mittels geeigneter hydraulischer Größen (z. B. lokale Reynolds- und Froudezahlen, Turbulenzgrad) als Funktion des Abflusses und der geometrischen Beckendimensionen beschrieben werden. Hierzu soll als optisches Messsystem ein PIV (Particle Image Velocimetry) eingesetzt werden, mit dem die Strömung berührungslos durch den Rinnenboden und die Seitenwände aufgenommen werden kann.

Der Aufbau des Messsystems ist nahezu abgeschlossen. Die Beschaffung der nötigen Geräte und Elemente (Kamera-System, Laser, ADV-Messsonden, Halterungen, Spiegel) wurde durchgeführt. Das Messsystem ist so konzipiert, dass der synchronisierte Messbetrieb von einem PIV und zwei ADV Messgeräten möglich ist. Die Messfrequenz des PIV-Systems beträgt max. 200 Hz, der Messbereich innerhalb eines ausgewählten Beckens beträgt ca. 45 cm x 40 cm. Zur Gewährleistung der Lasersicherheit an dem Versuchsstand wurde zudem ein Laserschutzkonzept vom Institut für Lasertechnologien in der Medizin und Messtechnik der Universität Ulm erstellt. Die entsprechenden Vorgaben sind momentan in der Umsetzung.

Die Untersuchungen werden durch Herrn Sokoray-Varga (Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT) in der BAW im Rahmen seiner Doktorarbeit durchgeführt werden.

3 Ergebnisse

Neben dem Aufbau des Messsystems wurden Voruntersuchungen mit einem Acoustic Doppler Velocimeter (ADV) in einem angepassten Modell des Schlitzpasses (Sohlneigung: 5 % bei gleichen Beckendimensionen) durchgeführt. Die Voruntersuchungen haben zu folgenden Erkenntnissen geführt:

1. Die Strömungssignatur innerhalb der Becken ist nicht ausschließlich von der Beckengeometrie abhängig, sondern auch von der Anströmungsrichtung des ersten Schlitzes in der Beckenreihe. Bild 1 zeigt beispielhaft zwei unterschiedliche Strömungssignaturen für das gleiche Modell des Fischpasses bei unveränderter Geometrie, jedoch unterschiedlicher Anströmung des ersten Schlitzes.
2. Die Anströmgeschwindigkeit eines Schlitzes beeinflusst die maximale Geschwindigkeit im Becken unterhalb des Schlitzes. Dadurch wird wiederum die Anströmgeschwindigkeit des nächsten Schlitzes beeinflusst. Das führt zu einem kumulierten Zuwachs der Geschwindigkeiten über die Beckenreihe, welcher durch Messungen in einem Modell mit einer genügend großen Anzahl an Becken quantifiziert werden kann.

Bild 3 zeigt Messwerte aus der Nähe des Schlitzes in Becken 3 und Becken 5. Die maximale Geschwindigkeit betrug ca. 1,05 m/s in Becken 3, während sie bereits für Becken 5 den Wert von 1,10 m/s überschreitet.

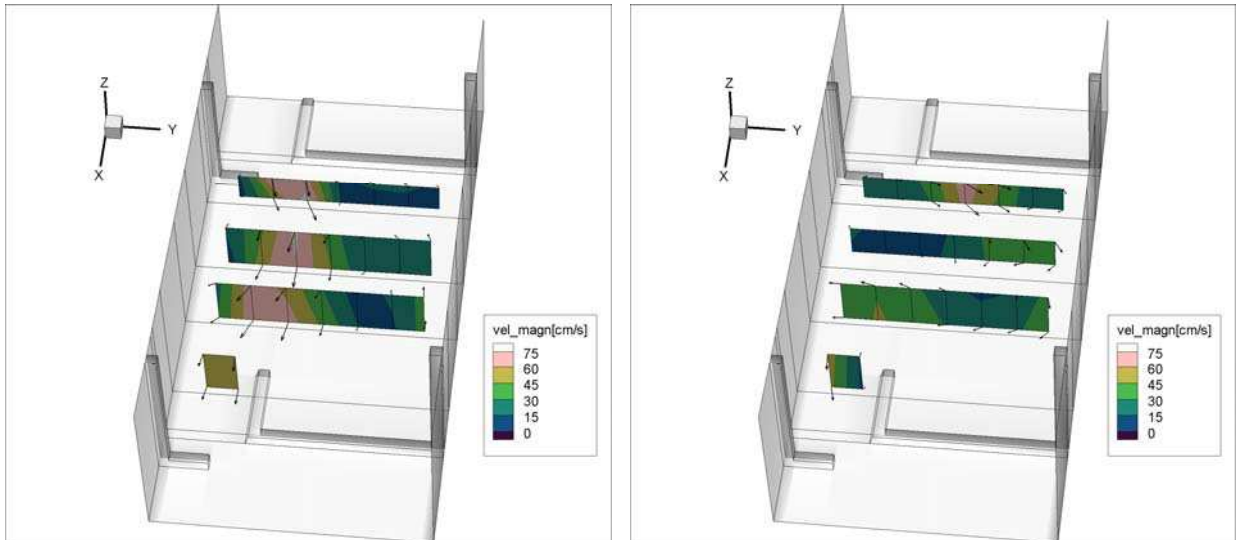


Bild 2: Unterschiedliche Strömungssignaturen in Becken 3 bei gleicher Geometrie aber unterschiedlicher Anströmungsrichtung des ersten Schlitzes

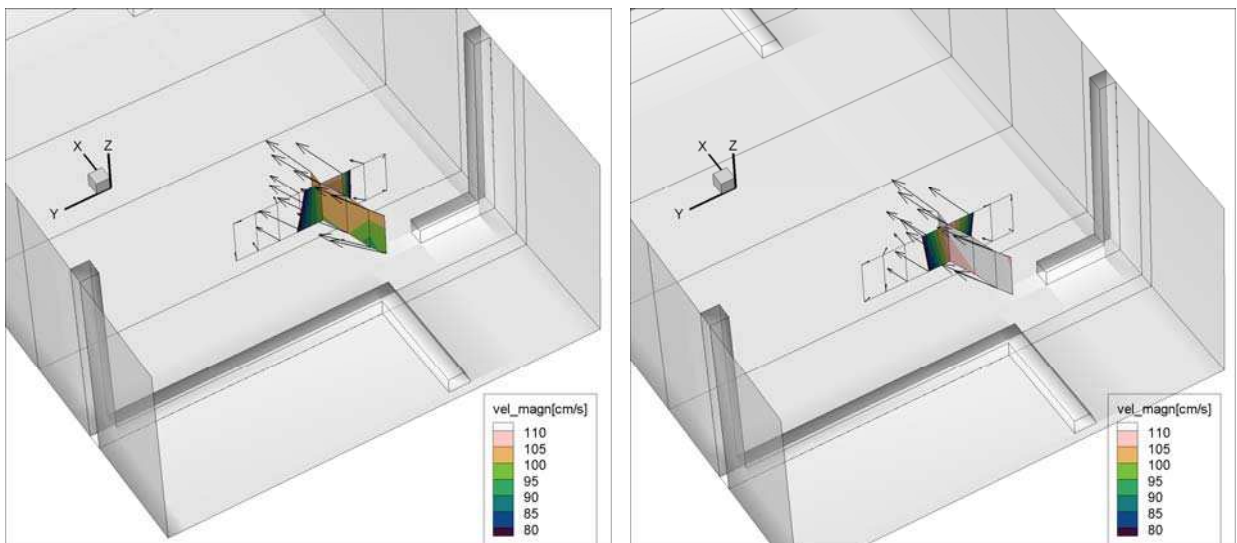


Bild 3: Von Becken zu Becken zunehmende maximale Fließgeschwindigkeiten im Bereich des Schlitzes (links: Becken 3, rechts: Becken 5)

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2012:
- Prüfung und Arbeitssicherheitstechnische Genehmigung des Messplatzes
 - Integrieren der Geräte zu einem Messsystem (Hardware und Software)
 - Testphase des Versuchsstandes
 - Auswertung der Daten
- 2013:
- Erste hydraulische Untersuchungen mit dem PIV
- 2014:
- Hydraulische Untersuchungen verschiedener geometrischer Varianten und Schlitz-Anströmungszustände des Schlitzpasses unter Variation des Abflusses
 - Ergebnissynthese und Ableitung eines hydraulischen Bemessungsverfahrens
 - Dokumentation

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. Prognosen, welche auf Modellierungen der Morphologie der Flusssohle beruhen, sind aufgrund des noch lückenhaften Prozessverständnisses derzeit sowohl in physikalischen als auch in numerischen Modellen mit zum Teil großen 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. Grundlage dafür sind Untersuchungen der physikalischen Phänomene, die zu allgemeingültigen und übertragbaren Ergebnissen und damit zur Verbesserung des Prozessverständnisses führen.

1.2 Bedeutung für die WSV

Eine genaue und detaillierte Kenntnis des Geschiebetransportes und der Bewegungsmuster 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 und Prognosen zugänglich zu machen.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel ist es, systematisch die Auswirkungen von Stromregelungs- und Unterhaltungsvarianten auf den Geschiebetransport und die Sohlformen in alluvialen, frei fließenden Gewässern näher zu analysieren und zu beschreiben, um sie damit mittels numerischer und physikalischer Modellierungen prognostizierbar zu machen. Daneben sollen durch vergleichende Analysen von Naturuntersuchungen die Maßstabgesetze 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 über das ganze Abflussspektrum naturähnlich abbilden zu können.

An einer modern ausgerüsteten Versuchsrinne (30 x 5 m) werden Untersuchungen zum Geschiebetransport durchgeführt. Im Jahr 2011 wurden Untersuchungen zur Auswirkung von im Rahmen der Unterhaltung modifizierten Strombauwerken auf den Geschiebetransport in der Strommitte durchgeführt. In Zusammenarbeit mit den Hochschulen in Kaiserslautern und Braunschweig wurden dazu die Auswirkungen von systematisch angeordneten Buhnenkerben auf die Strömung und den Geschiebetransport im Flussbett vermessen und analysiert.

Die Naturuntersuchungen an der Elbe an alternativen Bühnenformen (Knickbühnen und Bühnenkerben sowie Referenzbühnenfelder) wurden im Jahr 2011 fortgesetzt. Dieses Langzeitmonitoring wird ergänzt durch weitere Messungen zur Veränderlichkeit von Bühnenfeldgeometrien in ausgewählten Bühnenfeldern in anderen Abschnitten der Elbe, um die Ergebnisse verallgemeinern und übertragen zu können.

2 Untersuchungsmethoden

An der BAW stand im Jahr 2011 mit der Messmethode der dreidimensionalen Photogrammetrie ein einzigartiges System zur Messung der Sohlhöhen und Sohlformen zur Verfügung, mit welchem die relevanten statistischen Parameter einer Gewässersohle hochgenau und flächig 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.

Im Jahr 2009 wurde eine flussbauliche Systemrinne zur Untersuchung morphologischer Fragestellungen in Betrieb genommen. An dieser Rinne können systematische Untersuchungen zum Geschiebetransport durchgeführt werden. Die Rinne verfügt dafür über ein hochentwickeltes und weitgehend automatisiertes Messequipment für Wasserspiegel- und Sohlvermessungen. Der Geschiebeein- und -austrag kann zeitabhängig automatisch quantifiziert werden.

Im Jahr 2011 wurden Untersuchungen zur Auswirkung von Bühnenkerben auf die Strömung in den Bühnenfeldern (s. Bild 1) und auf die Sohlstruktur (s. Bild 2) im Fluss bei nicht überströmten Bauwerken durchgeführt. Erste Auswertungen erfolgen im Rahmen einer Diplomarbeit an der Technischen Universität in Kaiserslautern. Weitere Analysen werden in Zusammenarbeit mit dem Leichtweiss-Institut der Universität Braunschweig (LWI) und der Hochschule für Technik in Magdeburg durchgeführt.

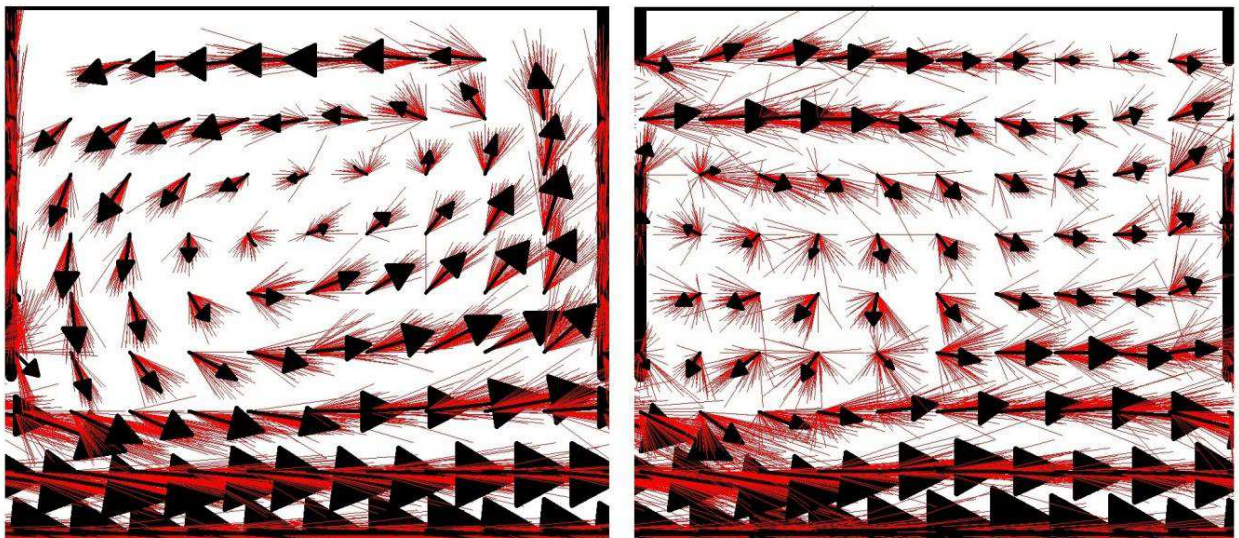


Bild 1: Vermessung der Dynamik und Größe von Fließgeschwindigkeiten in Bühnenfeldern mit und ohne Kerbe

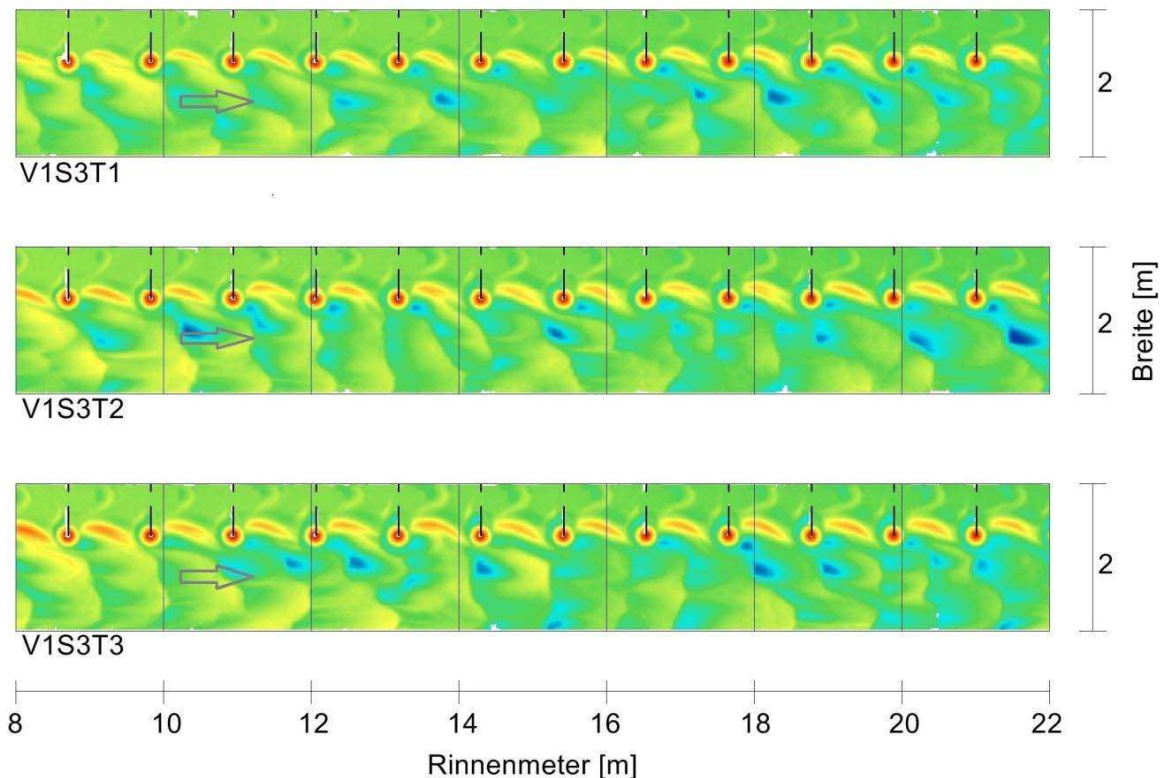


Bild 2: Sohlstrukturen in einer Versuchsrinne bei geöffneten Bühnenkerben (3 Versuchstage T1 bis T3).

3 Ergebnisse

Die neue flussbauliche Systemrinne wurde hydraulisch und morphologisch geeicht. Im Jahr 2011 wurden Untersuchungen zur Wirkung von Bühnenkerben auf die Hydraulik und den Geschiebetransport durchgeführt. Die Daten werden derzeit ausgewertet und einer Publikation zugeführt.

Die in Zusammenarbeit mit der BfG und Dritten durchgeführten Untersuchungen an Versuchsbühnen an der Elbe bei Schönberg wurden fortgesetzt. Im März 2010 fand ein gemeinsames interdisziplinäres BfG / BAW-Kolloquium in Magdeburg statt, bei dem die Ergebnisse von Biologen und Ingenieuren vorgestellt wurden. Die Ergebnisse wurden im Jahr 2011 zusammengefasst und werden in einer gemeinsamen Schrift im Jahr 2012 veröffentlicht. Die Naturuntersuchungen zu den hier betrachteten alternativen Strombauwerken (Knick- und Kerbbühnen sowie Referenzbühnen) wurden auch im Jahr 2011 fortgeführt. Für die kommenden Jahre ist ein reduziertes Monitoring der Untersuchungsstrecke vorgesehen. Die Untersuchungen werden ergänzt durch Untersuchungen an anderen ausgewählten Bühnen entlang der Elbe, um die gewonnenen Ergebnisse verallgemeinern zu können.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Fortführung der Untersuchungen an der flussbaulichen Systemrinne (Veränderung des Geschiebetransportes infolge Umgestaltung von Stromregelungsbauwerken im Rahmen der wasserwirtschaftlichen Unterhaltung). Dazu werden weitere Bühnen ohne und mit „Kerben“ unterschiedlicher Dimensionen in der Rinne untersucht. Wesentliche Schwerpunkte liegen dabei in der Auswirkung dieser geometrischen Modifikationen auf den Geschiebetransport in der Gewässermitte und auf die Austauschvorgänge zwischen den Bühnenfeldern und der Hauptströmung.

Fertigstellung der interdisziplinären Publikation mit der BfG und Dritten zu alternativen Strombauwerken. Fortsetzung der Naturuntersuchungen und -analysen (Buchveröffentlichung).

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

Netzplan-Nr.: A39530270001

Projektleiter: Dr.-Ing. J. A. Jankowski, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,
Referat Flusssysteme II (W2)

E-Mail: jacek.jankowski@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

Neben dem Potential für die erfolgreiche Nutzung der heterogenen *manycore*-Rechnerarchitektur spricht für ein Verfahren mit strukturierten Netzen auch die breite Verfügbarkeit von hochaufgelösten topographischen Daten in Rasterform und die Weiterentwicklung von vielen neuen numerischen Schemata für diese Art von Netzen. Von besonderem Interesse sind insbesondere die neuen konservativen Advektionsverfahren. Die bisher verwendeten Advektionsverfahren zu langfristigen Simulationen gewährleisten lediglich Massen- und Energieerhaltung. Dadurch wird zwar eine korrekte Reproduktion des Übergangs zwischen strömender und schießender Strömung erreicht, aber nicht umgekehrt. Es existieren pragmatische Ansätze zur Lösung dieses Problems in versetzten Netzen, die sich abhängig von der Veränderung der Froude-Zahl entlang einer Stromlinie auf die Energie- oder Impulserhaltung umstellen [Stelling GS, Duinmeijer SPA., 2003, Kramer SC, Stelling GS., 2009]. Erfahrungen sowohl zu der GPU-Implementierung als auch zu konservativen Advektionsverfahren, die in diesem Projekt gesammelt werden, sollen auch auf andere Verfahren, wie z. B. UnTRIM [Casulli V, Zanolli P., 2002], übertragbar sein.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

- Erarbeitung und Anwendung neuer Programmierparadigmen im Hochleistungsrechnen durch die Adaptierung von Casulli-Algorithmen für die neue Rechnerarchitekturen der Parallelrechner mit Hardware-Beschleunigung (Cluster bestehend aus Knoten mit Multi-Kern-CPU's und GPU's).

- Exemplarisch soll dies für das TRIM-Verfahren [Casulli V, Cheng R., 1992] erfolgen, bei dem die Erfolgsaussichten für eine erfolgreiche Implementierung als sehr hoch angesehen werden. Erfahrungen sollen auch auf andere Verfahren, z. B. UnTRIM [Casulli V, Zanolli P., 2002], direkt übertragbar sein.
- Entwicklung neuer Advektionsverfahren zur Erfassung der lokal und räumlich begrenzt auftretenden Übergänge in der Abflussart (über-/unterkritisch), die bisher teilweise außerhalb des Anwendbarkeitsbereiches der o. g. Verfahren liegen [Stelling GS, Duinmeijer SPA., 2003, Kramer SC, Stelling GS., 2009].

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

In der ersten Phase des Projekts vom Mai bis August 2010 wurden Vorbereitungsaufgaben realisiert (Zeitaufwand ca. 1,5 Monate):

- Eine Bachelor-Arbeit [Brückner, M. 2010] wurde mitbetreut, in deren Rahmen ein PC-basiertes Entwicklungssystem aufgebaut wurde, das in diesem Projekt verwendet werden kann.
- Die Bachelor-Arbeit erfasste auch die Evaluierung von neuen Programmiermethoden zur Nutzung von GPUs mit dem besonders geeigneten SPH-basierten Programm Spartacus-2D [Issa R., Violeau D. 2006].
- Teilnahmen an Schulungen „PGI GPU Tutorial“ zur ISC 2010 in Hamburg (Mai 2010) und „GPU Programming Using CUDA“ (HLRS Universität Stuttgart, Juli 2010).
- Es wurde die letzte originäre (serielle) Version des Programms TRIM (von Prof. Casulli, 1999) leicht modifiziert auf die heutige Rechenplattformen gebracht und ein Post-Processing-Programm für die visuelle Auswertung von Ergebnissen mit Tecplot entwickelt.
- Es wurden erste Tests der Machbarkeit einer möglichst wenig modifizierten TRIM-Version (mit PGI Accelerator Fortran Compiler), die eine GPU nutzt, durchgeführt.

Es zeigte sich bereits, dass das Erreichen von höheren Beschleunigungsraten für die gegebenen Programme auf heutiger Hardware und mit aktuellen Entwicklungswerkzeugen nur durch erhöhte Programmieraufwände zu erreichen ist. In der zweiten Phase des Projekts (März – Juli 2011) wurde mit veränderten Vorgaben gearbeitet, in dem die ersten Ergebnisse eine klare Abschätzung der Erfolgsaussichten bei der Portierung eines für TRIM bzw. UnTRIM grundlegenden Algorithmus für die GPU-Ausführung ermöglichen sollten. Hierzu wurde der Arbeitsplan modifiziert. Die folgenden Arbeiten wurden durchgeführt und Ergebnisse erzielt:

- Programmierung einer von Grund auf neuen Portierung für GPU eines vertikal gemittelten (2DV) Finite-Differenzen-Verfahrens (TRIM-2D-Grundlage) mit der Einführung der nicht-linearen Betrachtung vom Trockenfallen/Überfluten (ähnlich zu UnTRIM ab 2008) [Casulli V., 2009]. Dies erfolgte unter Verwendung der Programmiersprache CUDA C/C++ [NVIDIA Corporation 2011] und spezialisierten THRUST- und CUSP-Bibliotheken [Hoberock J, Bell N, Garland M., 2010] insb. für Speicherverwaltung, Datentransfer, Vektoroperationen und iterative Gleichungslöser für lineare Gleichungssysteme.
- Hiermit wurde eine komplette Adaptierung der gesamten Zeitschleife des gegebenen Verfahrens für eine GPU erreicht, die gleichzeitig Vergleiche der rechnerischen Performance auf einer GPU mit der seriellen Ausführung auf einem CPU-Kern ermöglicht.
- Für die Entwicklungsarbeiten wurde ein Standard-PC-System verwendet, ausgestattet mit 4-Kern Intel Xeon CPU X5570 (2,93 GHz, CPU mit 8 MB Cache) und mit Nvidia GeForce GTX 480 Grafikkarte (Fermi-GPU mit 1,4 Ghz, 1,5 GB Speicher, 480 Prozessoren organisiert in 15 Multiprozessoren).

- Das Verfahren erlaubt bei dem gegebenen PC-System und 1,5 GB Speicher der Grafikkarte Modellgrößen von 4,5 bzw. 9,5 Millionen Zellen bei doppelter bzw. einfacher Genauigkeit von Gleitkommazahlen. Bei vier unterschiedlichen Testfällen (ohne Ausgabe der Ergebnisse) wurden Beschleunigungen in der Größenordnung von 30 bzw. 20 für einfache bzw. doppelte Genauigkeit erreicht.
- Es wurde eine Verifikation des Verfahrens mit analytischen Lösungen durchgeführt [Thacker WC, 1981].
- Die Ergebnisse wurden auf dem 8. UnTRIM-Workshop in Trient (9.-11. Mai 2011) präsentiert.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Beginn des Vorhabens: 06. Mai 2010, ursprünglich geplantes Ende 31. Dezember 2012, aktuell 31. März 2013. Die Bearbeitung des Projekts wurde im Herbst 2010 ausgesetzt. Ab dem 1. März 2011 Wiederaufnahme der Arbeiten mit der Vorgabe, dass die zuerst erzielten Ergebnisse eine Abschätzung der Erfolgsaussichten ermöglichen sollen. Angesichts der bis Juli 2011 erzielten Ergebnisse gab es eine positive Bewertung der Erfolgsaussichten dieses Projekts. Die ab August 2011 gerade laufenden bzw. teilweise abgeschlossenen Arbeiten betreffen deswegen den neu entwickelten Code:

- Einbau von allen für wasserbauliche Aufgaben typischen Randbedingungstypen in generischer Form und Ermöglichung der Vorgabe einer beliebigen Bodentopographie, Tests mit der Verwendung von synthetischen Beispielen und existierenden BAW-Modellen.
- Einbau von Lagrange-Advektionsschema und konservativen Upwind-Advektionsverfahren nach [Stelling GS, Duinmeijer SPA., 2003] und Untersuchung derer Eigenschaften mit geeigneten Beispielen.
- Vortrag bei National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), Wellington, Neuseeland.
- Vorbereitung der Veröffentlichung und Präsentation von Ergebnissen auf der HIC2012-Konferenz in Hamburg (14-18. Juli 2012).

Weitere Arbeiten 2012-13:

- Arbeit an den Advektionsverfahren (Eigenschaften, geeignete GPU-Implementierung).
- Verbesserung der Performance bei der Ausgabe der Ergebnisse (Standard PC-System).
- Abhängig von der Ausstattung des im 2012 zu beschaffenden neuen Compute Servers: MPI-Parallelisierung bzw. Ausführung mit der Verwendung mehrerer GPU.
- Performance-Untersuchungen bei Testläufen mit BAW-Modellen.
- Zusätzliche Untersuchung alternativer Methoden der GPU-Portierung.
- Abhängig von Resultaten und Nachfrage: Übertragung der gewonnenen Erfahrungen auf andere Verfahren (Vorbereitung eines Folgevorhabens).
- Berichterstattung, Veröffentlichungen.

5 Literatur

- Casulli V, Cheng R. (1992) Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 1992; 15:629–648.
- Casulli V, Zanolli P. (2002) Semi-implicit numerical modelling of non-hydrostatic free-surface flows for environmental problems. *Mathematical and Computer Modelling* 2002; 36:1131–1149.
- Stelling GS, Duinmeijer SPA. (2003) A staggered conservative scheme for every Froude number in rapidly varied shallow water flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 2003; 43:1329–1354.
- Kramer SC, Stelling GS. (2009) A conservative unstructured scheme for rapidly varied flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 2009; 58:183-212
- Brückner, M. (2010) Aufbau eines Multi-Kern-GPU-Systems und Evaluierung von neuen Programmiermethoden für numerische Modelle, Bachelorarbeit, Duale Hochschule Baden-Württemberg, Karlsruhe
- Issa R., Violeau D. (2006) Guide to the Spartacus-2D V1P2 code: Lagrangian modelling of two-dimensional laminar and turbulent flows using the SPH method, LNHE, R&D EDF, 2006.

- Casulli V. (2009) A high-resolution wetting and drying algorithm for free surface hydrodynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids 2009; 60:391-408.
- NVIDIA Corporation (2011) NVIDIA CUDA C Programming Guide, Version 4.0. Available from: <http://developer.nvidia.com/nvidia-gpu-computing-documentation>.
- Hoberock J, Bell N. (2010) THRUST: A Parallel Template Library. Version 1.3.0. Software, <http://code.google.com/p/thrust/>.
- Bell N, Garland M. (2010) CUSP: Generic Parallel Algorithms for Sparse Matrix and Graph Computations. Version 0.1.. Software, <http://code.google.com/p/cusp-library/>.
- Thacker WC (1981) Some exact solutions to the non-linear shallow water equations, Journal of Fluid Mechanics 1981; 107:499-508.

Effizienz- und Genauigkeitssteigerung der Modellierung der Hydrodynamik der Flüsse mit einem kombinierten Multigrid- und Subgrid-Ansatz

Netzplan-Nr.: A39530270002

Projektleiter/in: Dr. R. Patzwahl, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,
Referat Flusssysteme II (W2), Prof. G. S. Stelling, TU Delft

E-Mail: regina.patzwahl@baw.de, g.s.stelling@tudelft.nl

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Bei der numerischen Modellierung von Flüssen ergibt sich oft ein Zielkonflikt zwischen der Genauigkeit und Korrektheit der Berechnung von Strömungszuständen und der zur Verfügung stehenden Rechenkapazitäten. Eine Effizienzsteigerung der Verfahren kann nicht nur durch Anwendung leistungsfähiger Hardware und entsprechender Programmieretechniken erreicht werden, sondern auch durch methodische Entwicklungen. Die sich in der Entwicklung befindende Subgrid-Methode erlaubt eine Erhöhung der Genauigkeit der Repräsentation der Bodentopographie des zu modellierenden Gebiets, ohne die Rechenaufwände zu erhöhen, und gleichzeitig eine wesentliche Verbesserung der Reproduktion von Überflutungs- und Trockenfallen-Prozessen [Casulli V, Zanolli P. 2002; Casulli V. 2009; Casulli V. , Stelling G.S. 2010]. Die bereits etablierte Multigrid-Methode, die eine Hierarchie der Haupt- und Subnetze nutzt, bringt eine Verbesserung der Effizienz des Lösungsverfahrens mit sich, insbesondere für (quasi-)stationäre Strömungszustände.

1.2 Bedeutung für die WSV

- Wesentliche Effizienzsteigerung der Berechnung von quasi-stationären und auch stationären Strömungen in Flüssen bei gleichzeitiger Erhöhung der Genauigkeit (auch in Hinblick auf morphodynamische Berechnungen).
- Effiziente Nutzung der in immer höherer Genauigkeit vorliegenden Geländemodelle, mit dem Ziel, ein Gleichgewicht zwischen rechnerischem Aufwand und der Korrektheit der Modellierung zu finden.
- Vertiefung der fachlichen Beziehungen zwischen Deutschland und den Niederlanden und ihren wasserbaulichen Einrichtungen Rijkswaterstaat und Deltares sowie der TU Delft.

1.3 Untersuchungsziel

- Analyse des Ist-Zustandes der numerischen Modellierung von Flüssen im Hinblick auf mögliche Verbesserungen der Modellierungsmethoden und deren Effizienzsteigerung.
- Entwicklung der Methoden für eine zur Topographie konsistent hoch aufgelöste Abbildung des Geschwindigkeitsfeldes auf Subgrid-Niveau.
- Untersuchung der Effizienz eines kombinierten Multigrid-/ Subgrid-Ansatzes zur Beschleunigung der Berechnung von stationären Strömungszuständen in Flüssen.
- Untersuchung der Genauigkeit der Subgrid-Methode bezüglich der Wiedergabe von Sohlschubspannungsverteilungen auf Subgrid-Niveau im Hinblick auf die Anwendbarkeit der Entwicklung in der Modellierung morphologischer Prozesse.

2 Untersuchungsmethoden

- Numerische Methoden für Strömungen mit freier Oberfläche und Morphodynamik der Flüsse, mit Betonung auf Multi- und Subgrid-Methoden.

3 Ergebnisse

In den ersten Monaten der Projektbearbeitung (2010) erfolgte neben erforderlichen Vorbereitungsarbeiten und einer Einarbeitung in die Werkzeuge der BAW eine Zusammenfassung der Problemstellungen und -behandlungen an der BAW, in Rijkswaterstaat und Deltares. Dies wurde ergänzt durch eine Zusammenstellung der für das Projektziel relevanten bereits vorhandenen Naturmessungen und

Labordaten und eine Zusammenschau der in Anwendung befindlichen numerischen Modelle und ihrer spezifischen Eigenheiten (UnTRIM, WAQUA, UNSTRUC, TELEMAC). Dies wurde in einem ersten Bericht 2011 erfasst.

Im Jahr 2011 wurden die folgenden Themen zum Teilaspekt „Numerische Modellierung mit Hilfe der Subgrid-Technologie“ bearbeitet:

- Aufbau eines hydronumerischen Modells (2D, auf strukturierten Netzen) unter Verwendung der Subgrid-Technologie
- Entwicklung eines Algorithmus zur Erkennung von Hindernissen und zur Zellteilung an diesen
- Entwicklung und Testen verschiedener Algorithmen zur Rekonstruktion der Geschwindigkeit; Zusammenarbeit mit N. Volp (TU Delft, Morphodynamic modelling of tidal estuaries)
- Entwicklung zur verbesserten Berechnung der Bodenschubspannung in einem z-Schichten-Modell; Weiterentwicklung für Subgrid-Technologie

Weiterhin wurde der Frage nachgegangen, inwieweit Multigrid-Gleichungslösungsverfahren die numerische Strömungsberechnung beschleunigen können. Dazu gehörten:

- Aufbau und Testen eines Multigrid-Gleichungslösers für das o.g. hydronumerische Modell
- Aufbau und Testen des Multigrid-Ansatzes als beschleunigenden Prekonditionierer für den im hydronumerischen Modell verwendeten Gleichungslöser (CGM)

An folgenden Veranstaltungen wurde im Jahr 2011 teilgenommen:

- Teilnahme Winter School “Numerical Methods for Free-Surface Flows”, Univ. Trento, 31.1.-11.2.2011
- Teilnahme 8. UnTRIM User Work Shop 9.-11.5.2011
- Teilnahme “UnTRIM Summer SubGrid Days 2011”, BAW Hamburg, 23.-24.8.2011

Darüber hinaus wurde am 20.9.2011 in Delft ein Statustreffen durchgeführt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Zeitspanne des Projekts ist 01.08.2010 – 31.07.2014, 4 Jahre.

2010/2011

Ziel: Überblick über den momentanen Stand der numerischen Flussmodellierung und seiner Einschränkungen bei BAW (D), Rijkswaterstaat (NL), Deltares (NL).

- Vorbereitende Beratungen, Besprechungen, Treffen, etc.
- Einarbeitung in die Arbeitswerkzeuge der BAW (D).
- Zusammenschau der Problemstellungen und –behandlungen an der BAW.
- Zusammenschau der Problemstellungen und –behandlungen bei Rijkswaterstaat und Deltares (NL).
- Zusammenstellung für das Projektziel relevanter vorhandener Naturmessungen und Labordaten.
- Zusammenschau der in Anwendung befindlichen numerischen Modelle und ihrer spezifischen Eigenheiten (UnTRIM, WAQUA, UNSTRUC, TELEMAC).

2011/2012

Ziel: Zusammenstellung möglicher Verbesserungen der Modellierungsansätze und –techniken. Diese sollen sämtlich auf die spezifischen Anforderungen der Flussmodellierung hinzielen. Die dazu gehörenden Tests werden mit Prinzipmodellen und mit in der Projektarbeit verwendeten Modellen durchgeführt werden. Es werden in dieser Phase open-source codes entstehen.

- Teilnahme an der zweiwöchigen Schulung von Prof. Casulli an der Universität Trient (Advanced numerical methods for the free surface flows).

- Entwicklung der Methoden für die korrekte Rekonstruktion der Geschwindigkeit und Schubspannungen auf Subgrid-Niveau (Subgrid and Conveyance method).
- Teilnahme am achten UnTRIM Workshop.
- Vorabuntersuchungen bezüglich der Multigrid-Methode mit dem existierenden Modell und strukturierten Netzen.

2012/2013

Ziel: Ausarbeitung und Testen der vielversprechendsten Ansätze. Untersuchung verschiedener numerischer Ansätze. Die dazu gehörenden Tests werden mit Prinzipmodellen und mit in Projektarbeit verwendeten Modellen durchgeführt werden. Es werden in dieser Phase open-source codes entstehen.

- Untersuchung verschiedener Diskretisierungsansätze (strukturierte vs. nicht strukturierte Netze, z- vs. σ -Schichten, Dimensionalität, Auflösung etc.).
- Untersuchung verschiedener Ansätze zur Berechnung der Advektion.
- Untersuchung verschiedener Turbulenzmodelle.
- Teilnahme an passenden Konferenzen/Workshops (auch UnTRIM).

2013/2014

Ziel: Benchmark-Test zur Verifizierung und Validierung der entwickelten numerischen Methoden. Eine Fallstudie (an einem vorhandenen Modell der BAW).

- Fallstudie eines in Bearbeitung befindlichen Flussabschnittes und Vergleich mit Naturmessungen.
- weitere Verbesserungen des numerischen Codes zur Integration in BAW- und Deltares-eigene Systeme.
- Teilnahme an geeigneten Konferenzen/Workshops (auch UnTRIM).
- Dissertation, Veröffentlichung(en), Präsentationen.

Die Arbeiten sollen zur Hälfte durch Ing. Platzek (TU Delft / Deltares) im Rahmen seiner Doktorarbeit am Standort BAW Karlsruhe durchgeführt werden. Die zeitliche Gestaltung des Aufenthaltes richtet sich nach fachlichen Erfordernissen.

5 Literatur

- Casulli V, Zanolli P. (2002) Semi-implicit numerical modelling of non-hydrostatic free-surface flows for environmental problems. *Mathematical and Computer Modelling*, 2002; **36**:1131–1149.
- Casulli V. (2009) A high-resolution wetting and drying algorithm for free surface hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 2009; **60**:391–408.
- Casulli V. , Stelling G.S. (2010) Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows. Erschienen online DOI: 10.1002/fld.2361, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*.

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 Staustufen 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 Flusstrecke (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. Mögliche Vereinfachungen dieser Vorgehensweise sind zu untersuchen und zu bewerten.

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 Regelungsanteil der OW/Q-Regelung ermittelt. Dieser OW- oder Regelungsanteil 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, mit denen die Stauregelung 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 System, bei dem 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 Flusstauhaltung hervorgerufen werden, was sich in zunehmenden Wasserstandsschwingungen zeigt. Daher können die Regelparameter nicht im Betrieb bestimmt werden, diese müssen vorab bereitgestellt werden. Die Auswirkungen unterschiedlicher Bewirtschaftungsstrategien können durch die BAW am Rechner analysiert und müssen nicht durch aufwändige und eventuell die Schifffahrt behindernde Naturversuche ermittelt werden.

1.3 Untersuchungsziel

Die Untersuchungsziele sind in den vorangegangenen Forschungskompodien umfassend beschrieben. Der vorliegende Jahresbericht beschäftigt sich mit den Saint-Venant-Gleichungen und möglichen Vereinfachungen in diesem Gleichungssystem. Dieses Wissen über die Regelstrecke ist dann notwendig, wenn der Regler über ein Modell der Regelstrecke die Regelung optimiert und damit das künftige Verhalten der Stauhaltung prognostiziert. Dies leistet z. B. die modellprädiktive Regelung (MPR), die im Forschungskompodium (2008) erläutert wurde.

2 Untersuchungsmethoden

Die Glieder der Impulsgleichung der Saint-Venant'schen Differentialgleichungen (1) werden mit Hilfe eines hydronumerischen Modells analysiert. Dafür wurde eine Untersuchungsstrecke als Rechteckgerinne in einem 1-D-HN-Modell aufgebaut, das in der Geometrie der Saarlauhaltung Mettlach ähnelt. Das prismatische Gerinne der Fließstrecke ist 23 km lang, 60 m breit und weist eine Sohlhöhendifferenz von 4 m zwischen den Rändern der Stauhaltung auf, woraus sich ein Sohlgefälle von 0,17 ‰ ergibt. Aus den Simulationsergebnissen wurden die Größen der Impulsgleichung rückgerechnet.

der mit dem Reibungs- und Sohlgefälle sowie dem Druckglied (rechtes Diagramm) fällt auf, dass die Beschleunigungsglieder ca. zwei Größenordnungen kleiner sind, selbst bei dem hier vorliegenden Falle eines ungewöhnlich schnellen Zuflussanstieges. Dieser geringe Einfluss der Beschleunigungsglieder wurde u. a. bereits von Henderson (1966) anhand einfacher Zahlenbeispiele für freifließende Gewässer beschrieben.

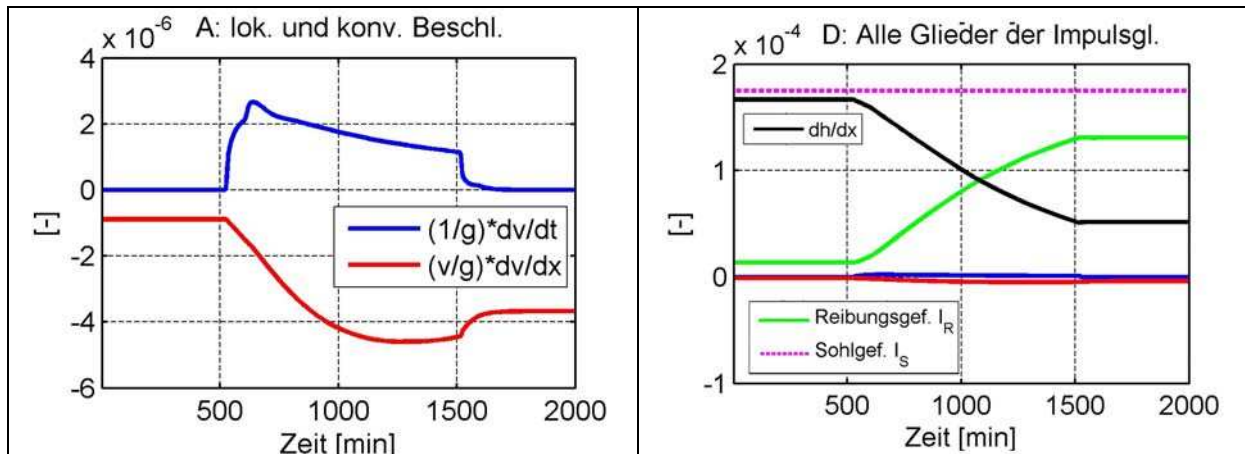


Bild 2: Zeitlicher Verlauf der Glieder der Impulsgleichung für einen vorgegebenen Fluss-km

Der in Bild 2 dargestellte zeitliche Verlauf der Glieder der Impulsgleichung ist an jedem Querprofil des 1D-HN-Modells ähnlich. Demnach kann die Konsequenz gezogen werden, dass in staugeregelten Fließgewässern die Beschleunigungsglieder in den St. Venantschen Gleichungen dann vernachlässigt werden dürfen, wenn die Zuflussänderung mit der Variabilität des natürlichen Zuflusses beschreibbar ist. Hierfür werden mit dem Diffusionswellenansatz die Fließverhältnisse in der Stauhaltung hinreichend genau beschrieben. Der Diffusionswellenansatz beschreibt eine parabolische partielle DGL der 2. Ordnung mit abflussabhängigen Variablen.

Besondere regelungstechnische Lösungsansätze, z. B. die modell-prädiktive Regelung MPR oder eine übergeordnete Steuerung mehrerer Stauhaltungen, erfordern eine detaillierte Betrachtung der Regelstrecke. Hier zeigt die Analyse der Impulsgleichung, dass der Trägheitsterm (Beschleunigungsglieder) vernachlässigt und die Regelstrecke mit dem Diffusionswellenansatz beschrieben werden kann. Dieser Ansatz ist numerisch einfacher zu formulieren und schneller und stabiler zu lösen als die St. Venantschen Gleichungen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das FuE-Vorhaben wurde Ende 2011 abgeschlossen. Zum Abschluss des FuE-Vorhabens wurden die Erkenntnisse am 17.11.2011 im Rahmen eines Workshops öffentlich präsentiert. Dazu wurden jeweils ein Fachvortrag durch die WSV und die Universität Stuttgart (Literaturstudie, Tätigkeitsbericht 2008) sowie drei Fachvorträge durch die BAW präsentiert und zur Diskussion gestellt. Die externen Teilnehmer kamen aus der WSV sowie von Universitäten, Kraftwerksbetreibern und Anbietern technischer Dienstleistungen.

Die Ergebnisse des FuE-Vorhabens werden in einem Mitteilungsblatt veröffentlicht, das 2012 erscheinen wird.

5 Literatur

Chow, V. Te, Maidment, D. R. and Mays, L.W. (1988): Applied Hydrology. McGraw-Hill Book Co., Singapore
Henderson, F. M. (1966): Open Channel Flow. Macmillan Publishing Co., Inc., New York

Bemessung und Konstruktion von Schlauchwehren

Netzplan-Nr.: A39530370001

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

E-Mail: michael.gebhardt@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Forschungsaktivitäten wurden nach dem Erscheinen des Mitteilungsblattes Nr. 91 „Untersuchungen zum Einsatz von Schlauchwehren an Bundeswasserstraßen“ im Dezember 2007 fortgesetzt. 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 dienen soll.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die bisherigen Erfahrungen mit der für die WSV neuen Technologie sind sehr positiv. Zurzeit werden an mehreren Standorten Schlauchwehre mit Verschlusshöhen zwischen 4,50 m und 5,00 m in Betracht gezogen.

1.3 Untersuchungsziel

Untersuchungsziele sind das Füll- und Entleersystem (F1), die Automatische Abfluss- und Stauzielregelung von Schlauchwehren (ASR) (F2), Optimierung von Maßnahmen gegen Schwingungen (F3), Finite-Elemente-(FE) Berechnungen (F4), Relaxation und Retardation der Schlauchmembran in der Klemmkonstruktion (F5), Werkstoffuntersuchungen (F6), Materialwahl für die Verankerungsschienen (F7) und Bemessungsbeispiele (F8).

2 Untersuchungsmethoden

Die Methoden orientieren sich an der Fragestellung und am Untersuchungsziel und beinhalten hydraulisch-numerische Berechnungen der Rohrhydraulik (F1), modellbasierter 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

Bei dem Aspekt der Dauerhaftigkeit von Schlauchwehren müssen auch die Risiken durch möglichen Vandalismus beachtet werden. Zur Abschätzung des Gefährdungspotenzials „Vandalismus durch Beschuss“ wurden Membranproben verschiedener Hersteller mit unterschiedlichen Dicken und Gewebelagen ausgewählt. Aufgrund des Gefahrenpotentials beim Umgang mit Waffen wurde eine staatliche Stelle für das Beschusswesen (Beschussamt Ulm) mit den Beschussprüfungen beauftragt (Maiser et al., 2012). Bild 1 zeigt eine Übersicht der gewählten Waffenarten und Schussentfernungen.

| Waffenart | Patrone | Kaliber | | Schussentfernung |
|--|---|-----------|---|------------------|
|  Sportschützengewehr |  | .22 lr | long rifle, Bleigeschoss | 10m |
|  Handfeuerwaffe |  | 9 mm x 19 | Vollmantel, Rundkopf- Geschoss | 5 m |
|  Winchester |  | .308 Win. | 7,62 x 51, Vollmantel- Spitz- Weichkern- Geschoss | 10 m |
|  Luftdruckgewehr |  | 4,5 mm | Diabolo | 10 m |

Bild 1: Ausgewählte Waffenarten, Kaliber und Schussentfernungen

Für Worst-Case Betrachtungen wurden jeweils kurze Schussentfernungen gewählt. Auf den 45 x 50 cm großen und ca. 14 mm dicken Materialproben wurden, wie aus Bild 2 links ersichtlich, Schulterstäbe für spätere Zugversuche aufgezeichnet. Die vorgesehenen Einschussstellen wurden jeweils in der Mitte der Schulterstäbe festgelegt. Bild 2 rechts zeigt die in der Beschusskammer eingespannte Probe mit den markierten Einschussstellen.

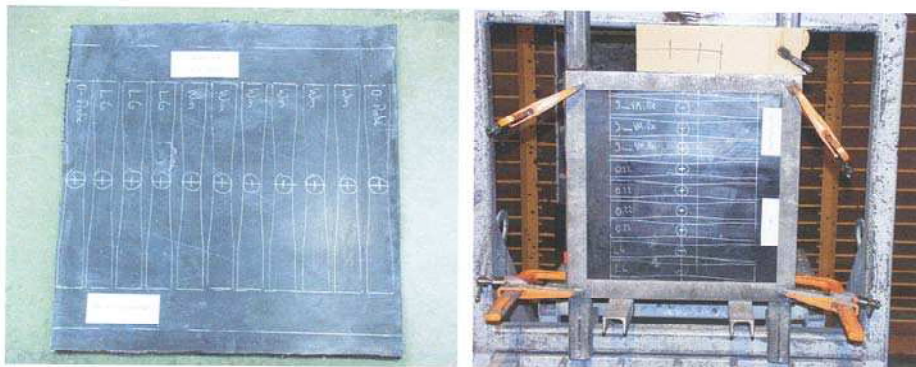


Bild 2: Membranprobe mit Besuchsstellenmarkierungen (links) und Einspannvorrichtung in der Beschusskammer im Beschussamt Ulm (rechts)

Mit Ausnahme der Handfeuerwaffe erfolgte der Beschuss aus einer fahrbaren Kabine. Die Geschwindigkeit wurde mit einer Kamera gemessen. Danach erfolgten eine stereomikroskopische Untersuchung und eine bildanalytische Auswertung der Einschussstellen. Die Mikroskopie zeigt, dass die Einschussstellen der Schlauchmembranen mit drei Gewebeeinlagen die geringsten Abmessungen aufweisen. Bild 3 zeigt eine stereomikroskopische Aufnahme für das Beschussergebnis mit Kaliber 308 Winchester, 7,62 x 51, Vollmantel-Spitz-Weichkern-Geschoss, bei einer Geschwindigkeit von 842 m/s für den Beschuss einer zweilagigen Schlauchmembran.

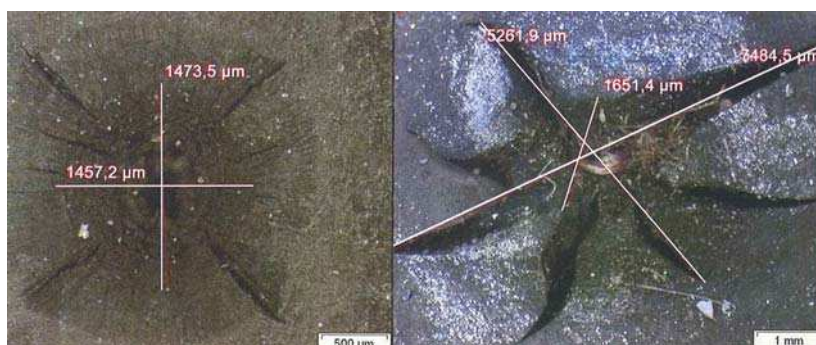


Bild 3: Stereomikroskopische Aufnahme einer Einschussstelle von einer zweilagigen Schlauchmembran (Kaliber 308 Winchester, 7,62 x 51, Vollmantel-Spitz-Weichkern-Geschoss, Geschwindigkeit 842 m/s): Einschussstelle (links) und Rückseite (rechts)

An den Einschussstellen wurde die Wasserdurchlässigkeit normal zur Ebene untersucht. Hierzu wurde, wie aus Bild 4 ersichtlich, in 2,65 m Höhe über den Proben ein Wassercontainer platziert. Mittig über den Einschussstellen wurde das mit einem Schlauch verbundene gläserne Erweiterungsstück aufgesetzt. Die Kontaktfläche zum Gummi wurde mit einer Dichtungsmasse abgedichtet. An jeder Einschussstelle erfolgte eine Dreifachbestimmung der Wasserdurchlässigkeit.

Der Beschuss mit dem Luftgewehr ergab keine Schadstelle. Mit dem Sportschützengewehr wurden jeweils die größten Wasserdurchlässigkeiten verursacht. Das zweilagige Material SBR (Styrol Butadien Rubber) zeigt eine größere Wasserdurchlässigkeit als das zweilagige EPDM (Ethylen Propylen Dien Kautschuk). Hinsichtlich der Anzahl der Gewebelagen konnte beim SBR kein signifikanter Einfluss auf die Wasserdurchlässigkeit festgestellt werden. Die größte Wasserdurchlässigkeit mit 1,33 l/h wurde bei dem zweilagigen Material SBR festgestellt. Als Resümee bleibt festzuhalten, dass die Leckagewassermengen infolge eines Einschusses äußerst gering sind und dadurch keine Funktionsbeeinträchtigungen zu erwarten sind [Maisner et al., 2012].

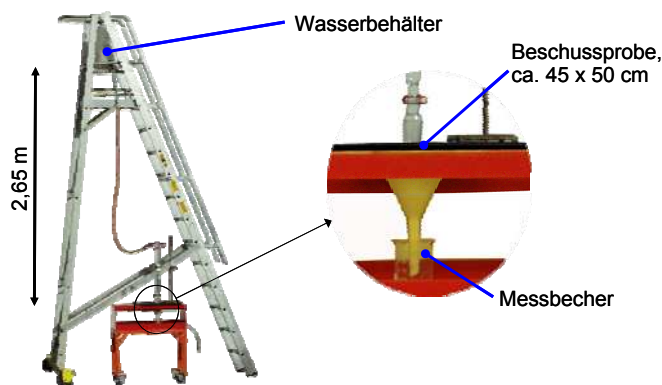


Bild 4: Messeinrichtung zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Einschussstellen

Seit September 2009 werden am Institut für Mechanik, Karlsruher Institut für Technologie, im Rahmen des Forschungsschwerpunktes F4 verschiedene Fragestellungen mit Hilfe von Finite-Elemente (FE)-Berechnungen untersucht. Erste Ergebnisse finden sich in [Maurer et al. (2012)] und [Gebhardt et al. (2011)]. Der Abschlussbericht wird im ersten Quartal 2102 vorliegen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Untersuchungen werden fortgesetzt und im Jahr 2012 in Form eines Merkblattes dokumentiert. Es ist geplant, zusammen mit der Voie Navigable de France eine Arbeitsgruppe einzurichten. Ein erster Informationsaustausch fand am 22. Juni 2011 in der Nähe von Dijon (Frankreich) statt. Dabei wurden auch die Obermeyer Wehre in Auxonne und Gray besichtigt. Von der BAW wird außerdem angestrebt, eine PIANC InCom Working Group zum Thema „Inflatable Structures in Hydraulic Engineering“ einzurichten.

5 Literatur

- Maisner, M.; Gebhardt, M.; Gabrys, U.; Maurer, A.; Schweizerhof, K. (2012): Schlauchwehre, Untersuchungen zum Widerstand der Schlauchmembran gegen Beschädigungen. In: Tagungsband zum 35. Dresdner Wasserbaukolloquium 2012: Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben. (eingereicht)
- Maurer, A.; Gebhardt, M.; Schweizerhof, K. (2012): Finite-Elemente-Analysen zur Optimierung der Geometrie und der Spannungsverteilung in der Membran von Schlauchwehren. In: Tagungsband zum 35. Dresdner Wasserbaukolloquium 2012: Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben. (eingereicht)
- Gebhardt, M; Maurer, A.; Schweizerhof, K. (2011): On the hydraulic and structural design of fluid and gas filled inflatable dams to control water flow in rivers. In: Proceedings of V. Conference on "Textile Composites and Inflatable Structures" (Structural Membranes 2011), 5. bis 7. Oktober 2011, Barcelona.

Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen

Netzplan-Nr.: A39530410035

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

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

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

Bei Beginn des Forschungsvorhabens existierten als einzige Berechnungsgrundlagen für die Einschätzung des Verkehrsflächenbedarfs von Binnenschiffen die Richtlinien für die Bemessung von Profilen in Schifffahrtskanälen und das Trassierungsverfahren TRASSE, welches Schlepplinien 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 fahrdynamischen 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.

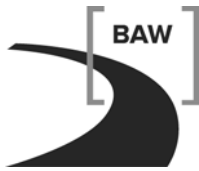
Fahrdynamische Modellierung

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 [Brix, J., 1993]. Unter Verwendung der Theorie schlanker Körper wird mit Hilfe einer lokalen Impulsanalyse im schiffsnahen Kontrollraum die auf den Schiffskörper wirkende hydraulische Querkraftverteilung ermittelt. Zusätzlich zu den Bewegungsgleichungen wurde das Modell mit einer virtuellen Navigation ausgestattet, welche auf der Grundlage der Wasserstraßengeometrie, der Abflussverhältnisse und der Verkehrsregeln ein Befahrbarkeitspotenzial des Gewässers ermittelt und daraus eine dem Optimum nahe Kursachse konstruiert. Unter dem Arbeitstitel PeTra 2D wurden auf Grundlage des beschriebenen fahrdynamischen Modells die 3 Bewegungsgleichungen für eine horizontale Bewegung hergeleitet, wobei Strömungsgeschwindigkeiten eines tiefen gemittelten 2D-Strömungsfeldes berücksichtigt werden [Kolarov, P., 2006]. 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. Die Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Binnenschiffsführungssimulator erfolgen im Rahmen des Forschungsvorhaben A39530410099 - Binnenschiffsführungssimulation.

3 Ergebnisse

Mit dem Abschluss dieser Grundlagenentwicklung gingen auch der Abschluss der Entwicklungen und Tests der Verfahren PeTra 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 1D 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 Schleppekurven von übergroßen, derzeit noch nicht existierenden Schubverbänden, berechnet und bewertet wurden. Gegenwärtig wird dieses Modell auf der Grundlage neuer Peildaten aus dem Jahr 2008 aktualisiert. Die Bereitstellung der flussbaulichen Daten und die Verkehrssteuerung für PeTra 1D 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 1D verglichen werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Entwicklungsarbeiten dieses FuE-Vorhabens sind abgeschlossen. Im Jahr 2012 wird der Forschungsbericht fertig gestellt.

5 Literatur

- Brix, J. (1993): Manoeuvring technical manual, Seehafenverlag Hamburg
Kolarov, P.(2006): Simulation von Schiffsbewegungen im Fließgewässer, Forschungsbericht der Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Meerestechnik, Rostock

Wartezeiten vor Engstellen

Netzplan-Nr.: A39530410036

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

E-Mail: bernhard.soehngen@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Wegen der anhaltenden Tendenz zum Bau größerer Fahrzeuge und der veränderten Zulassungsbedingungen für Fahrzeuge auf Binnenwasserstraßen, die generell größere Verbandszusammenstellungen erlauben, wird es vermehrt Wasserstraßenabschnitte geben, in denen nur bestimmte Fahrzeuge begegnen oder überholen können bzw. im Grenzfall sogar nur im Richtungsverkehr befahrbar sind. Dies gilt vor allem für Bereiche, in denen es ggf. künftig zu Einschränkungen der Fahrrinnenbreiten zugunsten größerer Fahrrinntiefen kommen könnte. 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 Bemessungsschiffen im Vergleich zur vorhandenen Fahrwasserbreite, auch die verkehrlichen Randbedingungen zu beachten. Hierzu ist das Verkehrsgeschehen zu simulieren.

1.2 Bedeutung für die WSV

Wartezeiten vor Engstellen oder begrenzte Überholmöglichkeiten mindern den volkswirtschaftlichen Nutzen des Verkehrsträgers Binnenschiff. Dieser muss u. a. dem Aufwand zur Engstellenbeseitigung gegenübergestellt werden. Wenn dieser unverhältnismäßig hoch ist, können Engpässe, die Begegnungen oder Überholungen von Fahrzeugen ausschließen, hingenommen werden.

1.3 Untersuchungsziel

Die Untersuchungen zielen auf die Entwicklung, Verifikation und Anwendung eines Verkehrssimulationsmodells für Binnenschiffe in Gewässern mit wechselnden Wasserständen unter Einschluss von Schleusen und Häfen, das mit möglichst wenigen Eingabedaten, z. B. hinsichtlich der Schiffsankünfte an Kontrollstellen, auskommt. Wegen eines Ende 2011 gestarteten Grundsatzauftrages der WSV zur Überprüfung von Fahrrinnenbreiten am freifließenden Rhein hat das Vorhaben eine besondere Aktualität und einen erweiterten Fokus erhalten. So soll nicht nur die Grenze möglicher Verkehre ausgelotet werden, sondern es sollen durch Einbeziehung des menschlichen Verhaltens der Schiffsführer auch Fahrsituationen einbezogen werden, die im Grunde technisch nicht zulässig oder möglich wären. Damit soll die Lücke zur Unfallanalyse geschlossen werden.

2 Untersuchungsmethoden

Die Simulation des Verkehrsgeschehens erfolgte bisher mit dem Verfahren BISS (Binnenschiffahrts-Simulator), das nach vorgegebenen fahrdynamischen Algorithmen der BAW von einer externen Firma im Auftrag der BAW entwickelt wurde. Die Verfahrensentwicklung ist algorithmisch 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 unterzogen.

3 Ergebnisse

Die Funktionstests des Programms BISS zeigten, dass eine Adaption an inzwischen gestiegene Anforderungen, insbesondere zur Berücksichtigung des „human factor“, aus programmarchitektonischen Gründen äußerst schwierig wäre. Dies liegt vor allem daran, dass das Programm im Wesentlichen Weg-Zeit-Kurven interpretiert. Zur Berücksichtigung des „human factor“ hat sich bei Straßenverkehrssimulationen inzwischen die „Mikrosimulation“ durchgesetzt, bei der jedes Fahrzeug und jeder Fahrzeugführer situativ, nicht nur schematisch anhand des Weg-Zeit-Diagramms, auf Verkehrssituationen – auch mit Fahrfehlern – reagiert. Mit diesem Verfahren können sehr gut die aus Naturbeobachtungen bekannten Zusammenhänge zwischen Verkehrsdichte und durchschnittlicher Fahrgeschwindigkeit (Fundamentaldiagramm) abgeleitet werden. Deshalb hat die BAW sich entschlossen, auf der Basis einer Marktanalyse einen neuen Partner zu suchen, der solche Mikrosimulationssoftware entwickelt, der Grundkenntnisse zur Fahrdynamik von Binnenschiffen mitbringt, dessen bestehende Programme am einfachsten auf die Belange des Frachtschiffsverkehrs adaptiert werden können und der bereit ist, seine Software vollständig offen zu legen. Als Ergebnis wird in Kürze eine Kooperation mit dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, Lehrstuhl für Verkehrsökonomie und -statistik der TU Dresden [M. Treiber, A. et al, 2010] beginnen. Die Modellverfahren sollen im Rahmen einer Dissertation weiterentwickelt werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Für 2012 ist seitens der BAW die weitere Aufbereitung von vereinfachten Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Verkehrsflächenbedarfs von Binnenschiffen aus Schlingelfahrt, Kurvenfahrt und Sicherheitsabständen sowie zu Schiffsgeschwindigkeit, Squat und Leistungsbedarf vorgesehen. Weiterhin werden im Rahmen des o. g. WSV-Auftrages Verkehrsbeobachtungen durch Videoaufnahmen durchgeführt und in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber ausgewertet. Die adaptierte Modellcodierung soll für den WSV-Auftrag bis Ende 2013 abgeschlossen werden. Anschließend ist die Anwendung des Verfahrens auf Musterstrecken an Ober-, Mittel- und Niederrhein vorgesehen.

5 Literatur

M. Treiber, A. Kersting, Verkehrsdynamik und -simulation, Springer-Verlag, 2010

Mindestabstände Schiff-Sohle zur Vermeidung von Steinschlägen

Netzplan-Nr.: A39530410037

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

E-Mail: bernhard.soehngen@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

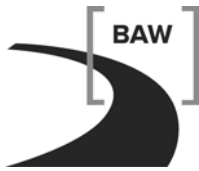
Langfristiges Ziel des Vorhabens ist es, die in der BAW entwickelten Verfahren zur Befahrbarkeitsanalyse im Hinblick auf den Aspekt Steinschlagschäden weiter zu entwickeln. Dadurch sollen insbesondere Prognosen zur Ermittlung praxisnaher Abladetiefen verbessert werden. Dabei ist der betriebswirtschaftliche Nutzen größerer Abladetiefen, insbesondere bei Niedrigwasser, den möglichen Schäden an den Schiffspropellern, gegenüber zu stellen, um die Entscheidung der Schiffsführer nachzuvollziehen.

2 Untersuchungsmethoden

Die bisherigen Erkenntnisse stützen sich überwiegend auf Modelluntersuchungen am Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme e.V. (DST) in Duisburg und Naturuntersuchungen zum Zusammenhang von Mindestflottwasser und Ansaugbeginn sowie zu den Propellerschäden bei angesaugten Steinen. Hieraus konnte ein vereinfachtes Modell für die Ansaugwahrscheinlichkeit und die Schadensakkumulation bei bestimmten schiffahrtlichen und sedimentologischen Randbedingungen entwickelt werden. Obwohl es nunmehr durch das Verfahren BSquat möglich wird, die wichtigsten Eingangsgrößen zur Ermittlung der Ansaugwahrscheinlichkeit, das Flottwasser, die Schiffsgeschwindigkeit und die Propellerdrehzahl eines Binnenschiffes bei gegebener Abladetiefe und praxisüblichem Leistungseinsatz der Antriebsorgane realitätsnah zu berechnen, sind Prognoseberechnungen der Ansaugwahrscheinlichkeit und des damit verbundenen Schadenspotenzials, wegen der noch nicht verifizierten Ansätze, derzeit nicht verlässlich möglich. Dies vor allem deshalb, weil immer noch nicht vollständig geklärt ist, welcher Mechanismus das Ansaugen der Steine tatsächlich auslöst. Um diese Frage abschließend zu klären, sind ergänzende Modellversuche am Leichtweiß-Institut für Wasserbau der Universität Braunschweig (LWI) vorgesehen. Dabei soll das Strömungsfeld im Ansaugbereich typischer Binnenschiffspropeller mit einem modernen 3D-Messverfahren (PIV) möglichst exakt und instationär aufgemessen werden. Diese Untersuchungen werden mit den im FuE-Vorhaben A39530410038 (Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle) vorgesehenen Kolkuntersuchungen kombiniert.

3 Ergebnisse

Im Arbeitsjahr 2011 wurden weitere Untersuchungen zugunsten des Vorhabens A39530410038 zurückgestellt.



4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Messung von 3D-Strömungsfeldern im Ansaugbereich von Schiffspropellern am LWI
2013: Voraussichtlicher Abschluss des Vorhabens

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

- 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
- 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 Kenntnisstand über hydraulische Belastungen der Wasserstraße durch Propulsionsströmungen grundlegend aufzuarbeiten. Dies erfolgte im Rahmen des FuE-Projekts in enger Zusammenarbeit zwischen der BAW und dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig zunächst auf Grundlage einer umfassenden Literaturrecherche und der Auswertung vorliegender Messdaten. Die Analysen führten zu neuen Berechnungsansätzen für die zeitliche Entwicklung des Schraubenkolks und die Endkolkentiefe, mit denen die schraubenstrahlinduzierte Kolkentiefe mit einer höheren Genauigkeit und in einem größeren Gültigkeitsbereich prognostiziert werden kann als mit bisherigen Ansätzen. Es zeigte sich allerdings ein erheblicher Forschungsbedarf. Um bestehende Unsicherheiten bei der Beschreibung der Wirkungen von Schiffsantrieb, Heckform und Ruderausbildung auf die Strahlausbreitung bei der Bestimmung des sohnahen Strömungsfeldes und der Sohlenschubspannung sowie in der Erfassung der zeitlichen Entwicklung des Kolks in unterschiedlichen Sohlenmaterialien zu minimieren, sind weiterführende physikalische Modelluntersuchungen erforderlich.

Die Sohlenerosion durch den Schraubenstrahl ist ein sehr komplexer Vorgang und daher durch analytische Ansätze nur schwer zu erfassen. Ein Lösungsweg zur Verbesserung und Erweiterung vorhandener semiempirischer Berechnungsmethoden zum Einfluss des Schraubenstrahls auf die Stabilität von Sohlen- und Ufersicherungen wird in der Entwicklung analytisch-numerischer Verfahren gesehen. 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) aus der Gasdynamik erfordern weniger Rechenzeit und Speicherkapazität. Ihre Anwendbarkeit für die Simulation der Schraubenstrahlausbreitung und der resultierenden Sohlerosion ist jedoch nachzuweisen.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die Untersuchungen führen zu einer Verbesserung der bestehenden Berechnungsverfahren zum Einfluss von Schraubenstrahlen 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

Die im Vorjahr durch das LWI begonnenen Vorversuche im physikalischen Modell wurden auf Grundlage systematischer Versuchsreihen fortgesetzt, um Probleme der zeitlichen Kolkentwicklung aus der Propellerstrahlbelastung infolge eines an der Stelle verharrenden modernen Großmotorgüterschiffes in der sog. Manövriersituation zu analysieren. Bei Zugrundelegung von zwei Propeller-Ruder-Anordnungen, einem Wageningen-Propeller mit Zentralruder und einem Kaplan-Propeller mit Kortdüse und Doppeleruder, war in Parameteruntersuchungen eine möglichst große Bandbreite von Belastungsszenarien abzudecken. Dies beinhaltete die Variation des Schiffstiefgangs, des Wasserstandes,

der Höhenlage des Propellers über der Sohle und der Propellerdrehzahl, wobei in den Versuchsreihen als Sohlenmaterial Grobsand und Feinkies verwendet wurde [LWI (2011)].

Zur vertieften Validierung von Lattice-Boltzmann-Verfahren für die Schraubstrahlausbreitung werden Laborversuche zur Ausbreitung eines kreisrunden Freistrahls im Wasser für unterschiedliche Reynolds-Zahlen modelliert und die Strahleigenschaften (abstandsabhängiger Öffnungswinkel, Geschwindigkeitsverteilung, Turbulenzeigenschaften) nachgerechnet. Bereits erfolgte Simulationen zum Naturversuch der BAW am Wesel-Datteln-Kanal vom Oktober 2005 waren für ein Rechengebiet mit mindestens 100 Mio. Freiheitsgraden und bei Erweiterung des Berechnungszeitraumes von bisher 60 Sekunden auf mindestens 5 Minuten Echtzeit weiterzuführen [Krafczyk, M. (2011)].

2 Untersuchungsmethoden

Experimentelle Untersuchungen

Die Untersuchungen wurden mit dem GMS-Hinterschiffsmodell (Gesamtabmessungen in der Natur: 110 m Länge, 11,45 m Breite) im Maßstab 1:16 im Versuchsbecken des LWI mit einer lichten Breite von 5 m und einer Länge von 15 m fortgeführt. Der Versuchsdurchführung lagen drei Vorgehensweisen zugrunde:

- Intervallversuche, in denen die Kolkiefen, Kolkängen und Kolkbreiten mehrfach während Versuchsunterbrechungen nach festgelegten Laufzeiten gemessen wurden,
- Dauerversuche, in denen die Kolkausbildung nach einer Gesamtversuchsdauer zwischen 2700 s und 10800 s ohne Unterbrechung erfasst wurde, vorwiegend um den Einfluss der Versuchsunterbrechung in den Intervallversuchen auf die Kolkentwicklung zu überprüfen und
- Langzeitversuche, in denen zur Abschätzung der asymptotischen Ausbildung der Endkolkiefe Versuchszeiten von mehreren Stunden bis maximal einem Tag realisiert wurden.

Die Erfassung der Kolkiefe und -geometrie erfolgte manuell mit Stechpegeln und zeitlich hoch aufgelöst mit Ultraschallsensoren. Im Rahmen weiterführender Kolkuntersuchungen ist eine berührungslose dreidimensionale Erfassung der Kolkgeometrie mittels eines Laser-Triangulationssensors (Optimes-Laserscanner) geplant [LWI (2011)].

Dreidimensionale hydronumerische Simulation der Schraubenstrahlausbreitung

Dem Simulationsmodell für die Berechnung der Freistrahls- und Propellerstrahlausbreitung liegt ein Lattice-Boltzmann (LB)-Verfahren in einer Multi-Relaxation-Time (MRT)-Variante zugrunde, welches für die Modellierung der turbulenten Strömung ein algebraisches Large-Eddy-Modell basierend auf dem Smagorinsky-Ansatz verwendet. Der Testfall „Freistrahlausbreitung“ in einen Halbraum wurde zusätzlich mit dem D3Q27 Lattice-Boltzmann-Verfahren mit einem Kollisionsmodell basierend auf der faktorisierten Kaskade, welche als implizites LES-Modell einzuordnen ist, untersucht und entsprechend gegenübergestellt. Der Einstromrand wurde mit einem Zylinder, der 0,5 m ins Gebiet hineinragt, modelliert. In den Untersuchungen zur Propellerstrahlbelastung wird die Bewegung der Schiffsschraube explizit dadurch berücksichtigt, dass in jedem Zeitschritt die entsprechenden Geschwindigkeitsrandbedingungen der Starrkörperbewegung lokal dem Fluid aufgeprägt werden. Für die Modellierung der Bodenrauigkeit wurde eine auf eine Zielrauigkeit von 20 cm geometrisch skalierte Geometrie einer 3D-Asphaltprobe aus einer Computertomographie dem geometrischen Modell hinzugefügt [Krafczyk, M. (2011)].

3 Ergebnisse

Grundlage für die Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus den **experimentellen Untersuchungen** für die angewendeten Untersuchungsmethoden, d. h. den Intervall- und Dauerversuchen, bildete der Nachweis der Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Der Nachweis konnte durch die Auswertung von Versuchsreihen mit unterschiedlichen Randbedingungen nachgewiesen werden. Beispielhaft zeigt Bild 1 die zeitliche Entwicklung der Kolkiefen für einen Versuch mit dem ummantelten Kaplan-Propeller und Doppelruder im Intervallversuch sowie im Dauerversuch nach einer Versuchszeit von 10 s, 1200 s bzw. 7200 s unter sonst identischen Versuchsbedingungen. In Bild 2 werden Versuchsreihen zur Kolkentwicklung hinter dem Wageningen-Propeller mit Zentralruder der zeitlichen Kolkiefenentwicklung hinter dem Kaplan-Propeller mit Doppelruder, jeweils als Intervallversuche durchgeführt, gegenübergestellt.

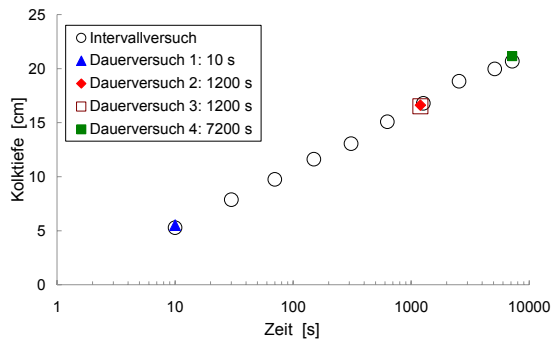


Bild 1: Einfluss der Versuchsdurchführung auf die Kolkungsverlauf am Schiff mit Kaplan-Propellers und Doppelruder

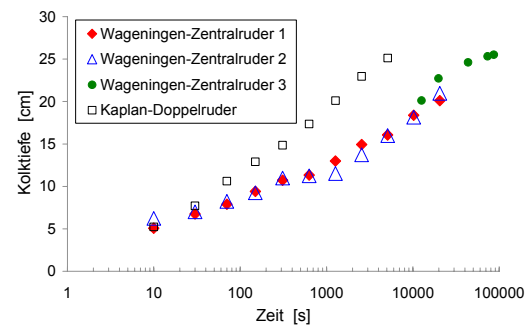


Bild 2: Kolkiefenentwicklung für den Wageningen-Propeller mit Zentralruder und dem Kaplan-Propeller mit Doppelruder

Auch in Bild 2 bestätigt die gute Übereinstimmung im Verlauf der wiederholt durchgeführten 'Wageningen-Versuchsreihen' mit gleichen Gesamtversuchszeiten und Versuchsintervallen (Reihen 1 und 2) und die Beibehaltung des Trends in der Kolkentwicklung der Versuchsreihe 3 die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse. Die semi-logarithmisch aufgetragenen Messergebnisse lassen zudem die erwartete Abnahme in der Kolkentwicklung erkennen, wonach kurze Belastungszeiten zu relativ großen Kolkentiefen führen und sich die Kolkentwicklung mit der Zeit stark reduziert. So betrug die Kolkentiefe nach ca. 5 Minuten Einwirkzeit typischerweise zwischen 70 % und 80 % des nach 40-45 Minuten ermittelten Wertes, wobei nach ca. 24 h im Modellversuch näherungsweise die Endkolkentiefe erreicht wurde. Bild 2 zeigt zudem, anders als es die Literatur erwarten lässt, für den ummantelten Kaplan-Propeller und der Doppelruderanordnung größere Kolkentwicklungen als im Fall des Wageningen-Propellers mit Zentralruder. Es bestätigt sich jedoch die grundlegende Erfahrung, dass die Propeller-Ruder-Anordnung einen erheblichen Einfluss auf die Sohlenbelastung nimmt. Der aus der Literatur erwartete Einfluss der Höhenlage des Propellers, der Propellerdrehzahl und der Sedimentkorngröße auf die Kolkiefenentwicklung wurde in weiteren Versuchsreihen bestätigt [LWI (2011)].

Die **HN-Berechnungen** konnten die Laborversuchsergebnisse zur Freistrahlausbreitung reproduzieren. So zeigt die Abnahme der Axialgeschwindigkeit eine gute Übereinstimmung mit der aus den physikalischen Versuchen ermittelten analytischen Lösung. Die Strahlauseitungswinkel, die kegelförmige Kernzone im Nahfeld und das Gaußsche Geschwindigkeitsprofil im Ähnlichkeitsbereich stimmen gut mit den Messergebnissen überein (Bilder 3 und 4).

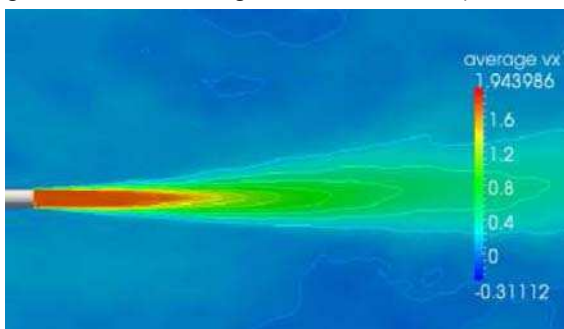


Bild 3: Gemittelte Axialgeschwindigkeit in der Simulation der Freistrahlausbreitung

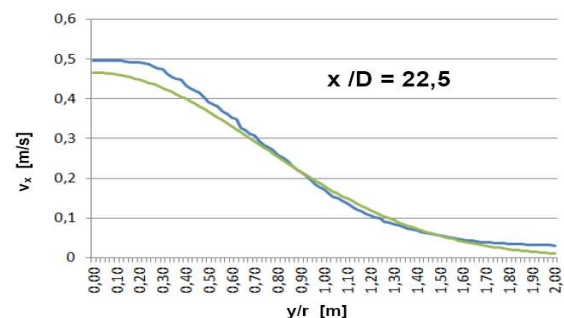


Bild 4: Vergleich eines axialen Geschwindigkeitsprofils aus Mess- und Berechnungsergebnissen

Ergebnisse zur Simulation der Schraubenstrahlauseitung hinter dem Großmotorgüterschiff beinhalten die Bilder 5 und 6. In Bild 5 zeigt sich, dass die in der Literatur mit 2,6-fachem Propellerdurchmesser angegebene Kernzonlänge näherungsweise in der Simulation reproduziert werden kann. Bild 6 zeigt die Abnahme der gemittelten axialen Schraubenstrahlgeschwindigkeit aus der LB-Berechnung nach 60 s Echtzeit und der Rechnung nach 314 s im Vergleich mit dem Ergebnis des semiempirischen Berechnungsansatzes. Die Ergebnisse der Simulationen für einen Zeitraum von ca. 5 Minuten Echtzeit machen deutlich, dass sich das System hinsichtlich der Schraubstrahlauseitung bei der Zeitspanne von ca. einer Minute, die den früheren Berechnungen zugrunde gelegt wurde, noch nicht im dynamischen Strömungsgleichgewicht befindet.

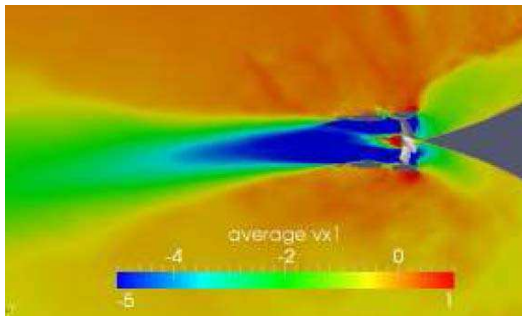


Bild 5: Draufsicht des zeitlich gemittelten Geschwindigkeitsfeldes in der Ebene der Propellerachse

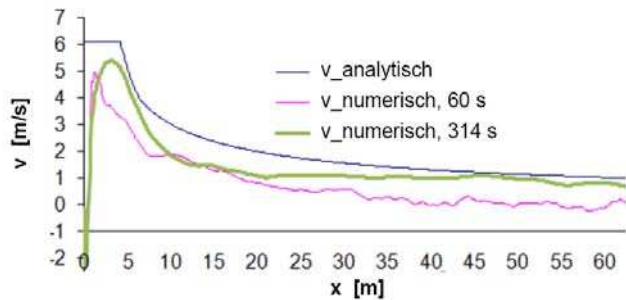


Bild 6: Gegenüberstellung der analytischen Geschwindigkeitsabnahme in der Propellerachse mit Simulationsergebnissen

Die HN-Berechnungen weisen ferner nach, dass hinsichtlich der Strahlenergie und der Belastung der Sohle lokale Einflüsse der strahlinduzierten Strömung nicht zu vernachlässigen sind. Die eingesetzten LES-Modelle berücksichtigen (im Gegensatz zu RANS-Modellen) räumlich sowie zeitlich lokale Veränderungen und sind somit geeignet, bei genauen Geometriekenntnissen eine verlässliche Aussage über raumzeitlich lokale Sohlenbelastungen zu treffen. Die zeitgenaue Modellierung turbulenter Strömungen mittels LES für die untersuchte Problematik, die u. a. auch Aussagen über Schwankungen des Geschwindigkeitsfeldes erlaubt, ist erwartungsgemäß sehr rechenaufwändig, aber möglich [Kraczyk, M. (2011)].

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Arbeiten zu den experimentellen Untersuchungen am LWI werden 2012 planmäßig weitergeführt. Nach Abschluss der Kolkversuche für die Manöversituationen, d. h. für ein stationäres Schiff, sind Versuche mit einem PIV-System zur Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens von Schraubenstrahlen bei veränderten Randbedingungen geplant. Die anschließende Versuchsphase beinhaltet bis zum Abschluss des FuE-Projekts Ende Juni 2013 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.

Die weiterführenden hydronumerischen Untersuchungen beinhalten in 2012 weitergehende Validierungsberechnungen zum Naturversuch am Wesel-Datteln-Kanal von 2005 mit einem auf dem Lattice-Boltzmann-Verfahren basierenden Large-Eddy-Ansatz, wobei die in den vorherigen Projekten benötigte Berechnungsdauer durch die Verwendung von Grafikprozessoren (GPGPU) deutlich verkürzt werden soll. Dazu sind methodische Erweiterungen des CPU-basierten Codes durchzuführen. Ziel der Arbeiten ist eine Gesamtberechnungsdauer von maximal einer Stunde zur Simulation von 5 Minuten Echtzeit. Das Rechengebiet umfasst dabei einen Nachlaufbereich hinter dem Propeller in einer Größe des ca. 50-fachen Propellerdurchmessers. Als geometrische Randbedingungen werden die Schiffsgeometrie mit Antrieb (Propeller als rotierende Impulsscheibe, Düse mit Spoiler, Doppelluder) modelliert. Geplant ist eine Gitterauflösung von zunächst ca. 15 Millionen Gitterpunkten im Vergleich mit der CPU-basierten Simulation aus einem vorherigen Projekt mit ca. 150 Mio. Gitterpunkten. Darüber hinaus sollen Testrechnungen mit weniger als 15 Mio. Gitterpunkten durchgeführt werden, um die Entwicklung des Fehlers für gröbere Gitter zu charakterisieren.

5 Literatur

- LWI (2011): Modellversuche zur Kolkbildung infolge eines Schraubenstrahlengriffs in einer Manöversituation (Zwischenbericht). Leichtweiß-Institut für Wasserbau, Bericht Nr. 1008, TU Braunschweig, Oktober 2011.
- Kraczyk, M. (2011): Bericht zur Durchführung von Validierungs- und HN-Berechnungen zur Untersuchung der Schraubenstrahlausbreitung hinter einem stationärem Großmotorgüterschiff mit dem Lattice-Boltzmann-Verfahren. Consultant Computational Engineering, Braunschweig. 31. Oktober 2011.

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

Das Forschungsprogramm KLIWAS des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung soll klimabedingte Änderungen auf Wasserstraßen für den Zeitraum bis 2100 abschätzen. KLIWAS trägt dazu bei, den umweltfreundlichen Verkehrsträger Wasserstraße leistungsfähig zu erhalten und dabei ökologische und ökonomische Aspekte gleichermaßen zu berücksichtigen. Die BAW ermittelt im KLIWAS-Projekt 4.04 u. a. am Beispiel der Anpassungsoption „der abgestuften Fahrrinne“ die notwendigen Mindestfahrrinnenbreiten, und prüft, ob durch Reduzierung der Breite der Fahrrinne mit begrenztem Aufwand bei Niedrigwasser durchgängig eine größere, durchgängige Tiefe erreichbar ist. Technischer Standard bei der Fahrrinnendimensionierung ist derzeit die Nutzung kommerzieller Schiffsführungssimulatoren. Diese sind nach Ergebnissen des BAW-FuE-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 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 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 auch Fragestellungen der 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 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 Zentralinstitut für Arbeitsmedizin und Maritime Medizin (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

Folgende Arbeiten wurden im Berichtszeitraum durchgeführt:

- Mathematisches Konzept zur Suche optimaler Fahrwege
- Aufbau eines human-factor-Modells
- Anbindung eines Autopiloten an das Simulationsverfahren PeTra2D
- Auswertung der Naturuntersuchungen

3.1 Mathematisches Konzept zur Suche optimaler Fahrwege

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde ein Optimierungsverfahren für Schiffsfahrwege im fahrdynamischen Modell PeTra2D entwickelt. Das Optimierungsverfahren variiert die Ruderwinkel während eines Fahrmanövers und findet durch Minimierung einer vorgegebenen Zielfunktion ein optimiertes Manöver. Die Zielfunktion besteht aus der Bedingung, dass das Schiff beim jeweiligen Manöver innerhalb der vorgegebenen Fahrspur bleiben und einen minimalen Flächenbedarf besitzen soll. Da dieses Optimierungsproblem durch die vielen möglichen Kombinationen aus Ruderwinkeln zu verschiedenen Zeitpunkten komplex ist, wurde ein evolutionärer Optimierungsalgorithmus ausgewählt, der durch eine geschickte Wahl und Variation der Steuermanöver nach relativ wenigen Versuchen schon eine gute Lösung finden kann.

Das Optimierungsverfahren ist vor allem für komplexe Strömungssituationen und Engstellen geeignet, wo normale Autopiloten fahrdynamischer Modelle an ihre Grenzen stoßen, und ist bereits für einige Fälle getestet worden. Mit dem Optimierungsverfahren ist es möglich, Fahrmanöver mit minimalem Flächenbedarf zu fahren.

3.2 Aufbau eines human-factor-Modells

Zusammen mit der Universität Kassel, Fachgebiet Mensch-Maschine-Systemtechnik, wurde folgende Herangehensweise für den Aufbau eines human-factor-Modells erarbeitet:

Zunächst soll eine Expertenbefragung an Land eine Übersicht über das Verhalten der Schiffe und der Schiffsführer auf schwierigen Strecken geben. Durch eine darauf folgende Literaturstudie und Vorbereitung der Untersuchung soll festgelegt werden, wie das human-factor-Modell aussehen könnte und welche Eingangsgrößen, Störgrößen und freien Parameter das Modell besitzen soll. Daraufhin wird eine Messkampagne mit teilnehmender Beobachtung und Befragung von drei Schiffsführern an Bord von Rheinschiffen durchgeführt, ausgewertet und bezüglich der Modellierung des Menschen zu einem Modell zusammengefasst. Die Kodierung des Modells folgt dann in einem weiteren Arbeitspaket.

3.3 Anbindung eines Autopiloten an das Simulationsverfahren PeTra2D

Die Universität Stuttgart, Institut für Systemdynamik, entwickelte ein Programm zur Approximation dynamischer Schiffsparemeter aus geometrischen Schiffsdaten. So können dynamische Schiffsparemeter wie Konstanten und Koeffizienten zur Beschreibung der Drehgeschwindigkeit, des instabilen Moments, der Ruderverstärkung, des Driftwinkels, der Ruderquerkraft etc. aus bestehenden Daten von Messfahrten berechnet werden.

3.4 Auswertung der Naturuntersuchungen

Während der fahrdynamischen Naturuntersuchungen wurden bei den begleiteten 17 Schiffen GPS-Empfänger an Bug und Heck montiert, die im sekundlichen Abstand die Position des Schiffes aufnahmen. In einem ersten Schritt der Auswertung wurden die Positionen der Schiffe ausgelesen, in Gauß-Krüger-Koordinaten transformiert und anschließend mit dem Programm FAHRDYN auf die vier Eckpunkte eines das Fahrzeug umhüllenden Rechtecks umgerechnet und dargestellt. Weiter wurde mit dem Verfahren CfAA eine Fourieranalyse der Fahrt durchgeführt, sodass der Versatz des Schiffes durch Quer- und Drehbewegungen unabhängig von den gefahrenen Kurven auf der Strecke dargestellt werden kann (siehe Bild 1). So können die einzelnen Fahrten miteinander verglichen und Aussagen zur durchschnittlich benötigten Fahrspurweite über einzelne Streckenabschnitte getroffen werden.

Bisher sind noch zu wenige der Fahrten ausgewertet, um hier Aussagen präsentieren zu können. Die Untersuchungsergebnisse geben aber schon erste Hinweise zur Festlegung einer Mindestbreite der Fahrrinne. Die Untersuchungsergebnisse zeigen weiter, dass der Querströmungseinfluss und die zeitverzögerte bis fehlerhafte Reaktion des Schiffsführers, z. B. auf Kursabweichungen oder Instabilitäten des Schiffskurses, einen erheblichen Anteil an der Mindestbreite der Fahrrinne haben und genauer quantifiziert werden müssen. Der hier eingeschlagene Weg über die Interpretation von Naturdaten ermöglicht eine möglichst direkte Bemessung für beobachtete Standardsituationen. Weiterhin ermöglicht die weitergehende Analyse der CfAA-Auswertungen die pragmatische Berücksichtigung von human-factor-Effekten für nicht beobachtete Fahrsituationen unter Zuhilfenahme von Simulationsergebnissen mit PeTra2D.

Bergfahrt, Rhein-km 517 - 505

Abgriff des Gesamtversatzes im Bereich von 400 Metern

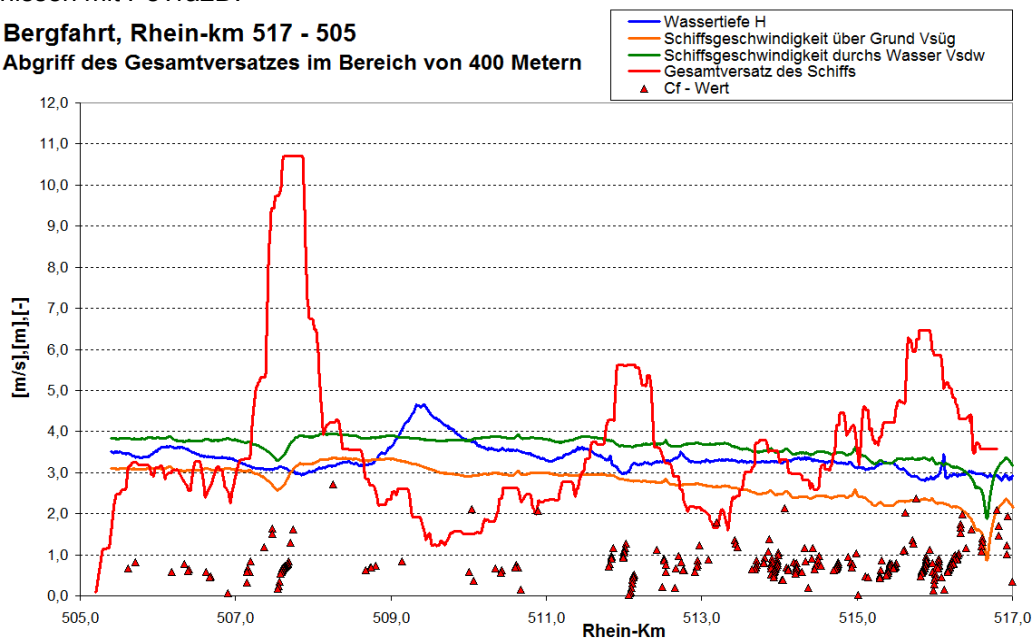
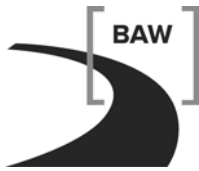


Bild 1: Beispiel der Auswertemethode CfAA, Gesamtversatz des Schiffes und weitere Kenngrößen über die Strecke

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Entsprechend der genannten Untersuchungsschwerpunkte werden bis Ende 2013 die folgenden Arbeitsschritte verfolgt:

- Vervollständigung und Auswertung der Naturuntersuchungen zur Validierung, Kalibrierung und Modellverbesserung, bis voraussichtlich 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 besserer Infosysteme, optimale Steuerung, flussangepasste Binnenschiffe.

Binnenschiffsführungssimulation

Netzplan-Nr.: A39530470003

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

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

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Ende 2010 wurde durch die Bundesanstalt für Wasserbau für den Bereich Binnenschifffahrt eine Schiffsführungssimulator ANS5000 beschafft. Im Vorfeld der Beschaffung des Schiffsführungssimulators ANS5000 wurde durch einen international anerkannten Fachexperten eine Analyse hinsichtlich der Möglichkeiten und Grenzen der in Europa vorhandenen Schiffsführungssimulatoren bezüglich der Bemessung von Schifffahrtsstraßen erstellt, die unter anderem zu folgenden Ergebnissen führte:

Stand der Technik bei den Herstellern:

- Von fast allen Herstellern wird bestätigt, dass in den letzten Jahren die Verbesserung des Sichtsystems vorrangig betrieben wurde und weniger eine Verbesserung der mathematischen Modelle.
- Viele Simulatoren wurden überwiegend als STCW-konforme (Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers) und damit relativ einfache Simulatoren geordert und verkauft.
- Die Entwicklung neuer und verbesserter mathematischer Modelle ist sehr kostenintensiv, was bei dem steigendem Konkurrenz- und Preisdruck nicht durchsetzbar war und ist.
- Bei den kommerziellen Herstellern fehlt in vielen Fällen das notwendige direkte Know-how im Bereich Hydrodynamik/Hydraulik.

Stand der Technik bei den Betreibern:

- Viele Simulatoren sind nur mit einem Minimum an Personal ausgestattet, was ein intensives Eindringen in die Modellzusammenhänge kaum erlaubt.
- Der komplexe Aufbau heutiger Simulatoren erfordert ein über die nautische Ausbildung hinausgehendes mathematisches und naturwissenschaftliches Wissen, um die Simulatoren für Bemessungsaufgaben oder Befahrbarkeitsanalysen optimal nutzen zu können und um Schwachpunkte der Simulatoren durch „work-arounds“ mildern zu können.
- Betreiber, die in eine wissenschaftliche Einrichtung (Hochschule) integriert sind, weisen deutlich höhere Kompetenzen auf.

1.2 Bedeutung für die WSV

Aus dem Trend, dass immer größere Schiffe in den vorhandenen Wasserstraßen fahren (überlange Verbände auf dem Rhein, üGMS auf dem Neckar), gewinnen Fragestellungen wie z. B. nach dem Einfluss von Querströmungen auf die Fahrt eines Binnenschiffes, nach der Wechselwirkung Schiff/Schiff bzw. Schiff/Wasserstraße, nach der Leistungsfähigkeit der Ruderanlagen und nach Squat und Banking immer mehr an Bedeutung. Viele dieser Fragen lassen sich nur noch durch komplexe Simulationen der Schiffsbewegung beantworten, in denen das Schiff durch einen Regelkreislauf (fast-time-simulation) oder in besonders anspruchsvollen Fahrtrevieren durch einen Schiffsführer nach Sicht gesteuert wird. Derartig komplexe Untersuchungen waren mit den bisher in der BAW vorhandenen Werkzeugen nicht möglich.

1.3 Untersuchungsziel

Der in der BAW Karlsruhe vorhandene Schiffsführungssimulator ANS5000 ist für die Ausbildung des nautischen Personals auf Seeschiffen entwickelt. Diese Anlage wurde seitens des Herstellers soweit an die Belange der Binnenschifffahrt angepasst, dass die Steuerung des Simulationsschiffes über eine Binnenschiffsbrücke mit originalen Bedienelementen erfolgt. Alle notwendigen Anzeigeelemente erscheinen generisch auf Bildschirmen und gewährleisten so ein Höchstmaß an Flexibilität, indem die Anzeigeelemente an die unterschiedlichsten Schiffstypen bzw. Untersuchungsziele angepasst werden können. Darüber hinaus verfügt der Simulator über ein Sichtsystem und ein Radarequipment,

welche es erlauben, das Simulationsschiff in einer Manöverfahrt wahlweise nach Sicht- oder Radarnavigation zu steuern.

Die in dem ANS5000 enthaltenen Modellverfahren sollen durch die in der BAW entwickelten Verfahren für die fahrdynamische Begutachtung von Wasserstraßen erweitert und darüber hinaus Schnittstellen zu den flussbaulichen HN-Modellen eingerichtet werden. Damit soll es möglich werden, insbesondere Manöversituationen wie z. B. Schleusen- oder Hafeneinfahrten, Fahrsituationen mit Wechselwirkung Schiff/Schiff und Schiff/Wasserstraße oder die Durchfahrung von 2D-Strömungsfeldern, die die Fahrt des Schiffes beeinträchtigen können, untersuchen und beurteilen zu können.

2 Untersuchungsmethoden

Numerische Methoden:

- Entwicklung von Rudermodellen (Heck- und Bugstrahlruder) basierend auf Ansätzen aus der Seeschifffahrt. Überarbeitung dieser Ansätze mittels Ergebnissen aus Modellversuchen sowie numerischen Berechnungen [BAW (2005), Müller, S.-B.; Tenzer, M. (2009), SNAME (1988/1989), Söding, H. (1986)]
- Entwicklung eines Wellenmodells auf Basis der zuerst von Boussinesq 1872 für konstante Wassertiefe veröffentlichte und nach ihm benannten Boussinesq-Wellengleichungen (BoWave 2D) [Schröter, A. (2007-2010)]
- Erhöhung der Auflösung des fahrdynamischen Modells des ANS5000 durch Implementierung von in der BAW entwickelten Modellverfahren [Gronarz, A. (1997), Kolarov, P. (2006)]
- Durchführung von Modelluntersuchungen zur Kalibrierung der o.g. Modellverfahren [Cap. Brix, J. (1993)]

Naturuntersuchungen:

- Einmessung von fahrenden Binnenschiffen und Aufzeichnung aller Maschinen- und Ruderkommandos
- Entwicklung von Manöverfolgen zur Kalibrierung der Schiffsmodelle für den ANS5000 und Erstellung der Validierungsdokumente

3 Ergebnisse

Im Jahr 2011 wurden auf Grundlage des bereits entwickelten Messprogramms drei Schubverbände in unterschiedlichen Formationen eingemessen. Gegenwärtig werden die entsprechenden Modelle für den Schiffsführungssimulator erstellt.

Der ANS5000 wurde um einen Rechner erweitert, auf dem das Wellenmodell BoWave 2D parallel zur Simulation die infolge der Schiffsbewegungen induzierten Wellen berechnet. Mittels einer selbst entwickelten Schnittstelle werden die notwendigen Daten aus der Simulation zur Verfügung gestellt. Die Vorbereitungsarbeiten zur Umsetzung des Verfahrens BoWave 2D auf eine Grafikkarte wurden abgeschlossen, so dass im Jahr 2012 damit begonnen werden kann, in größeren Fahrtgebieten schiffsinduzierte Wellen in Echtzeit zu rechnen. Darüber hinaus wurde ein im Vorfeld entwickeltes Modell zur Berechnung der Ruderkräfte eines Binnenschiffsruders integriert, welches alternativ zu dem im Simulator enthaltenen Modell genutzt werden kann.

Erstmals wurde der ANS5000 im Jahr 2011 für die Projektbearbeitung eingesetzt. Aus diesem Anlass wurde parallel zu den Entwicklungsarbeiten ein Fahrtrevier für die Hochwasserfahrt inklusive einem zugehörigen Sichtmodell für den Rhein zwischen km 550 und 560 aufgebaut.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Bis Ende 2013 sind folgende Entwicklungen vorgesehen:

- Entwicklung eines Prä- und Postprozessors für das Wellenmodell BoWave, Anbindung an den ANS5000 und Portierung auf einen Grafikkartenrechner zur Reduzierung der Rechenzeiten
- Modellierung der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße durch die Überführung der Ergebnisse aus dem Modellverfahren BoWave in die Strömungsdatenbasis des ANS5000

- Erweiterung der Kollisionsmodelle des ANS5000 durch BAW-eigene Modelle
- Entwicklung eines neuen Squatmodells durch Einführung einer Schwimmbedingung auf der Grundlage der Ergebnisse aus dem Modell BoWave
- Modellierung der Ansaugeffekte zum Ufer auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse aus dem Verfahren BoWave
- Entwicklung eines Autopiloten für Manöverfahrt
- Anpassung der peripheren Software zum ANS5000 an die erweiterten Modellverfahren

5 Literatur

- BAW (2005): Abschlussbericht zum FuE Projekt 8154 Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässerberandung. BAW-Bericht, Karlsruhe
- Cap. Brix, J. (1993): Manoeuvring technical manual, Seehafenverlag Hamburg
- Gronarz, A. (1997): Rechnerische Simulation der Schiffsbewegung beim Manövrieren unter besonderer Berücksichtigung der Abhängigkeit von der Wassertiefe; Entwicklungszentrum für Schiffstechnik und Transportsysteme (DST)
- Kolarov, P. (2006): Simulation von Schiffsbewegungen im Fließgewässer, Forschungsbericht der Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik, Lehrstuhl Meerestechnik, Rostock
- Müller, S.-B.; Tenzer, M. (2009): Ruder- und Bugstrahlruderkräfte (Kurzbezeichnung); Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT); Universität Duisburg-Essen, Bericht Nr.: F-007/2009
- Schröter, A. (2007-2010): Numerische Modellierung schiffsinduzierter Wellen im regulären Projektbetrieb der BAW auf Basis der Boussinesq-Wellengleichungen, Untersuchungsabschnitt 1 bis 4, Bad Sachsa
- SNAME (1988/1989): Principles of naval architecture; Band 1: Stability and strength; Band2: Resistance, propulsion and vibration; Band 3: Motions in waves and controllability
- Söding, H. (1986): Kräfte am Ruder; In: Handbuch der Werften XVIII, S. 47–57

Konsolidationsverhalten von Baggergut (Schlick)

Netzplan-Nr.: A39550110100

Projektleiter: Dr.-Ing. M. Pohl, Dienststelle Hamburg, Referat Geotechnik Nord (K1)

E-Mail: martin.pohl@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

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

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

An frischen Schlickproben aus vergleichbaren Revieren wurden 2008 ergänzende Laborversuche durchgeführt, um die bodenmechanischen Eigenschaften für die numerischen Berechnungen eingren-

zen zu können. Für die numerische Simulation wurde wegen der messtechnisch erfassten großen Verformungen und der rheologischen Eigenschaften des Schlicks ein Finite-Differenzen-Programm (FLAC3D) verwendet. Aus zeitlichen Gründen, aufgrund der regulären Projektbearbeitung, wurde im Sept. 2008 das Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau der Technischen Universität Bergakademie Freiberg beauftragt, ein Simulationsmodell aufzubauen und die Stoffparameter zu kalibrieren. Im Oktober 2010 wurde deren Endbericht vorgelegt.

3 Ergebnisse

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

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

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

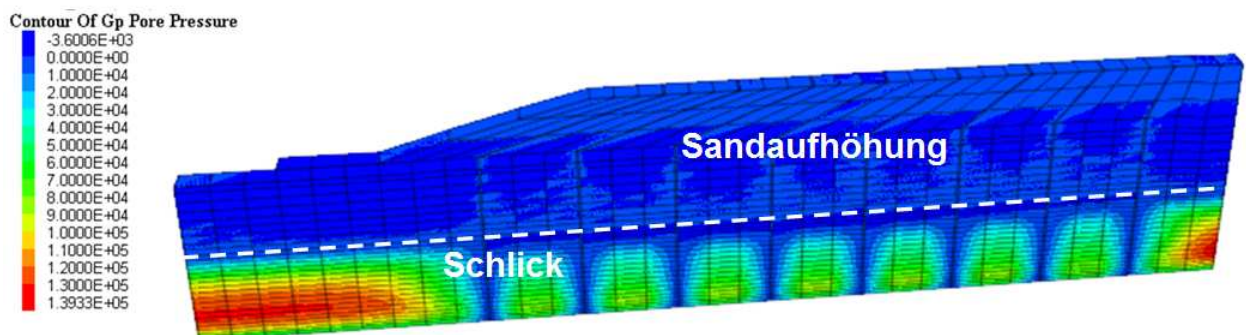


Bild 1: Porenwasserdruckverteilung im numerischen Simulationsmodell mit Vertikaldränagen und Sand-aufhöhung

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

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

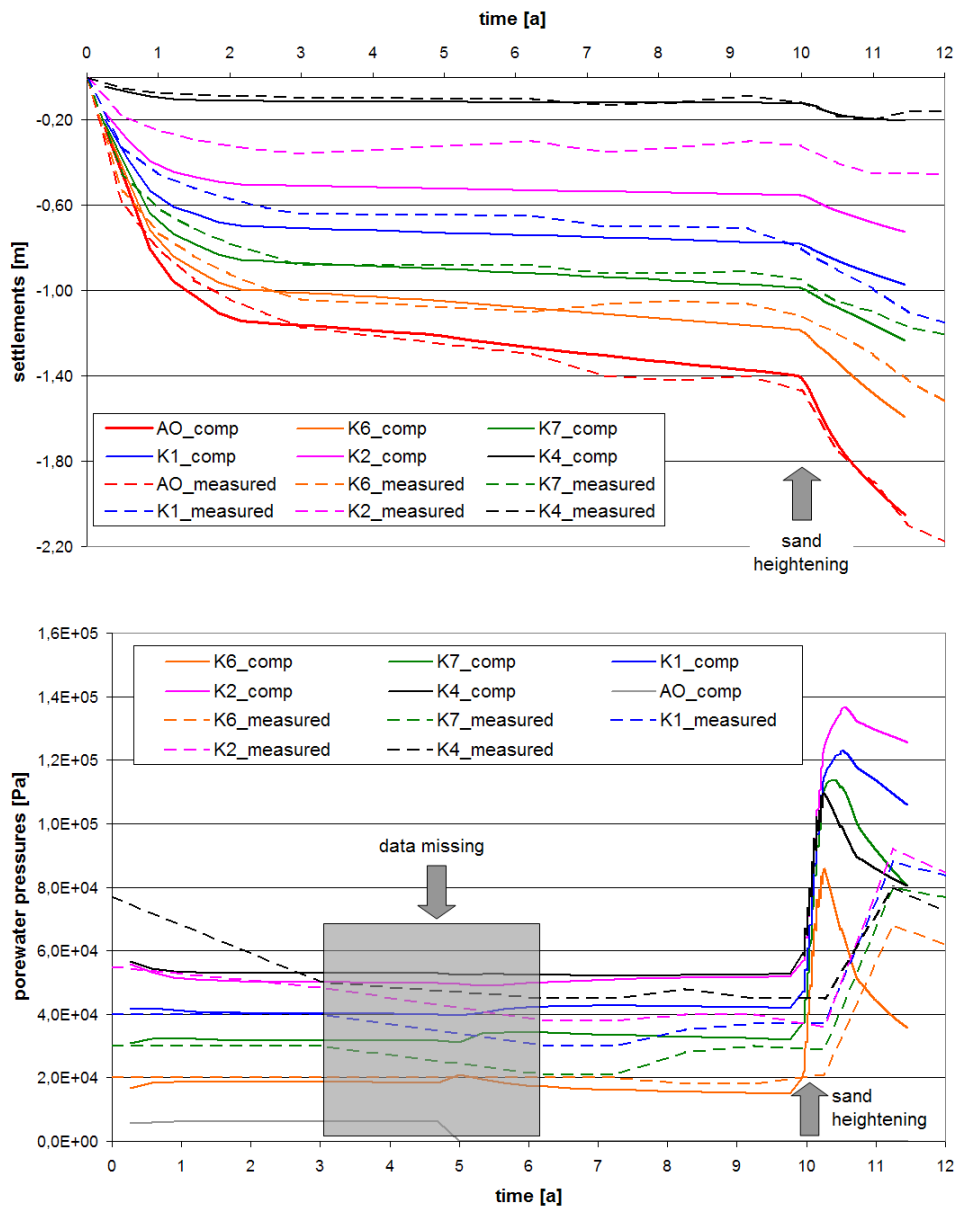


Bild 2: Vergleich der numerisch simulierten (Linien) mit physikalisch gemessenen (Strichlinie) Ergebnissen / oben: Setzungen, unten: Porenwasserdrücke

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: In situ Beprobungen zur Ermittlung der vorliegenden Bodenparameter und deren Abgleich mit dem numerischen Modell; Dreidimensionale Simulation des Großversuchs mit Sandauflast; Ermittlung und Berücksichtigung der Gasentwicklung im Schlack.

Bearbeitungszeitraum: bis Ende 2013

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

Pohl, M.: Konsolidationsverhalten von Baggergut, BAW-Kolloquium „Bauen in Weichböden an Wasserstraßen“, Hamburg, 15. September 2011

Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau

Netzplan-Nr.: A39550110158

Projektleiterin: Dipl.-Geol. Anne Heeling (Mitarbeiterin: Dipl.-Ing. (FH) Angelika Jakobs),
Dienststelle Hamburg, Ref. Geotechnik Nord (K1)

E-Mail: anne.heeling@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Beurteilung des Korrosionszustandes einer Stahlspundwand erfolgt anhand der charakteristischen Werte der Korrosion „Mittlere Abrostung“ (→ Spannungsnachweis) und „Maximale Abrostung“ (→ Durchrostung), die sich derzeit zuverlässig nur mittels einer statistischen Auswertung von Ultraschall-Restwanddickenmessungen ermitteln lassen. Das Referat Geotechnik 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 „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 wurde. 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 vor Ort (2007 und 2008) durchgeführt.

In Zusammenarbeit mit der Fa. Evologics, Berlin, erfolgten 2009 Vergleichsmessungen im Labor zur Beurteilung der Aussagekraft und Praxistauglichkeit des Ultrabreitbandsonar-Verfahrens. 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 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,
- 2007 auf dem HTG-Kongress in Dresden,

- 2009 auf dem Workshop „Spundwände – Profile, Tragverhalten, Bemessung, Einbringung und Wiedergewinnung“ der TU Hamburg-Harburg und
- 2010 auf der Fachtagung „Bauwerksdiagnose 2010“ in Berlin 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 vor-Ort-Vergleichsmessungen 2007 aber zu widersprüchlichen Ergebnissen führten, ergab eine erneute Messkampagne 2008, dass die Messungenauigkeit 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. Weitere, seit 2010 geplante vor-Ort-Vergleichsmessungen scheiterten an den unzureichenden Kapazitäten der Fa. Evologics.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Damit Wanddickenmessungen von den Wasser- und Schifffahrtsämtern vermehrt an Ingenieurbüros vergeben werden können, ist geplant, in 2012 eine detaillierte Beschreibung zur fachgerechten Durchführung und Auswertung von Ultraschall-Messungen zu erarbeiten, die dann als Ausschreibungsgrundlage für Wanddickenmessungen dienen kann.

Weiterhin werden alternative Verfahren zur Spundwanddickenmessung auf ihre Praxistauglichkeit hin geprüft und bewertet.

Bearbeitungszeitraum: 10/2001 bis 12/2012

5 Literatur

European Communities (2007): Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour. Final report. ECSC Steel RTD program. Contract number 7210-PR/317. Final report.

Deckwerksanalyse mit der Distinkt Element Method (DEM)**Netzplan-Nr.:** A39550170270**Projektleiter:** Dr.-Ing. M. Pohl, Dipl.-Ing. L. Mittelbach, Dienststelle Hamburg,
Referat Geotechnik Nord (K1),**E-Mail:** martin.pohl@baw.de, livia.mittelbach@baw.de**1 Problemstellung und Ziel**

Kenntnisse über Schädigungsmechanismen und Widerstände von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen sind für eine wirtschaftliche Bemessung von Deckwerken in der WSV unverzichtbar. Für die komplexen und vielfältigen Randbedingungen in den Ästuarien sind die derzeitigen Bemessungsgrundlagen unzulänglich. Das Ziel ist, mit Hilfe numerischer Verfahren die Widerstände von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen für die jeweiligen lokalen Randbedingungen im Tidegebiet zu erfassen und eine integrierte Bemessung zu ermöglichen. Schädigungsmechanismen können auf Grundlage der Simulationen hergeleitet werden. Naturmessungen dienen der Validierung des numerischen Modells.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Bemessung von Deckwerken erfolgt derzeit auf Grundlage von Erfahrungswerten und physikalischen Modellansätzen (z.B. Hansen (1985), GBB (2004), EAK (1993 u. 2002)). Durch kleinmaßstäbliche Modellversuche und Beobachtungen in der Natur wird auf die Widerstandsfähigkeit des Deckwerks gegenüber den hydraulischen Einwirkungen geschlossen, wobei die Interaktion Seeschiff – Deckwerk bisher nur unzureichend untersucht wurde.

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.

1.2 Bedeutung für die WSV

In der WSV werden im Rahmen der Unterhaltung und des Neubaus große Mengen an Deckwerkssteinen als Ufersicherung eingebaut. Eine Bemessung von Deckwerken und Bühnen im Tidebereich ist häufig mit Unsicherheiten verbunden. Mitunter treten Deckwerksschäden auf, deren Ursachen nicht einhellig geklärt sind.

Durch eine numerische Analyse der lokalen Randbedingungen, d.h. hydraulische Belastung (Tide, Wind- und Schiffswellen, Grundwasserpotentiale), Bodenaufbau, Filtermaterial, Deckwerkssteine (Form, Größe, Masse) und Deckwerksdicke, kann die Ermittlung der Stabilität des Deckwerks mit / ohne Verklammerung verbessert werden und eine individuelle Bemessung erfolgen. Aufgetretene Schäden können durch die numerischen Simulationen auf verursachende Mechanismen zurückgeführt werden.

1.3 Untersuchungsziel

Mit Hilfe numerischer Verfahren soll die Widerstandsfähigkeit von Deckwerken gegenüber hydraulischen Belastungen für die jeweiligen lokalen Randbedingungen im Tidegebiet erfasst werden und eine sichere sowie wirtschaftliche Deckwerksbemessung ermöglichen. Schädigungsmechanismen sollen auf Grundlage der Simulationen hergeleitet werden. Die numerischen Ergebnisse werden an Beobachtungen sowie Messungen in der Natur und im Modell sowie an Erfahrungswerten validiert.

2 Untersuchungsmethoden

Die Deckwerkssteine können in ihrer Form, Größe und Masse mit der DEM in drei Dimensionen (hier 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. 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 ganzheitlich 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. Die Programme PFC3D, FLAC3D und CCFD werden miteinander gekoppelt.

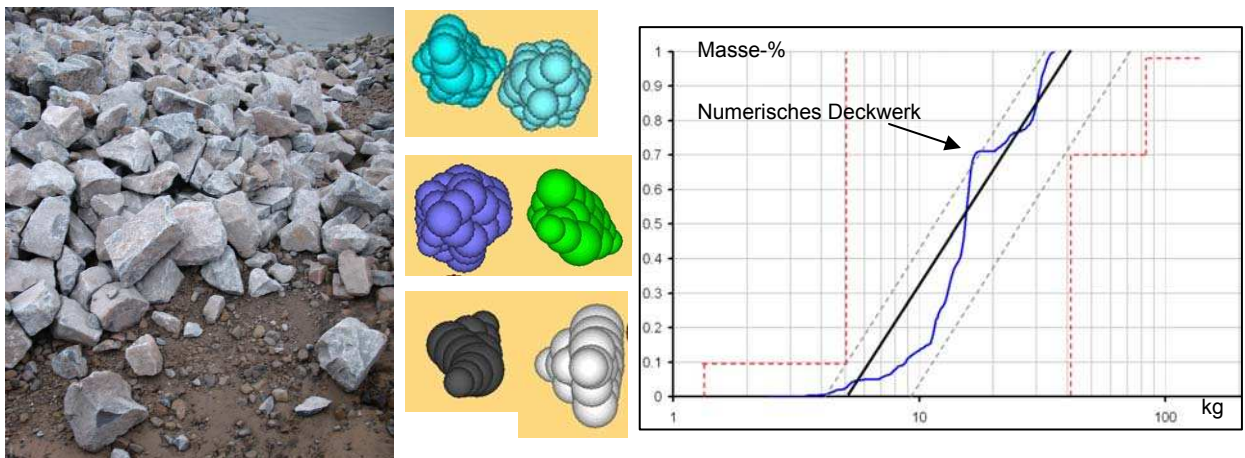


Bild 1: reale und numerische Deckwerkssteine (Beispiel), Summenkurve $LMB_{5/40}$

Mittels physikalischer Modellversuche in der großen hydraulischen Rinne der BAW-DH sollen die numerischen Parameter für die Deckwerkssteine kalibriert werden. Hierbei wird ein Abschnitt mit losen Deckwerkssteinen durch eine böschungsparelle Strömung beansprucht. Steinverlagerungen werden videometrisch und messtechnisch erfasst, um die Messergebnisse im numerischen Modell simulieren zu können.

Reale und künstliche Deckwerkssteine sollen mit Messeinheiten zur Aufnahme von translatorischen und rotatorischen Bewegungen (Beschleunigungs- und Drehratensensoren) instrumentiert und in bestehenden Deckwerken eingebaut werden. Über die Messung der Beschleunigung und Lageänderung infolge der hydraulischen Belastungen soll auf die wirkenden Kräfte rückgerechnet werden. Hierzu werden ergänzende videometrische Aufnahmen der Wellenbilder und Messungen der hydraulischen Einflussgrößen durchgeführt. Im numerischen Modell sollen das hydraulische Ereignis und die resultierenden Beschleunigungen / Kräfte an den Deckwerkssteinen simuliert werden.

Des Weiteren werden die numerischen Ergebnisse an Beobachtungen in der Natur und Erfahrungswerten plausibilisiert und validiert. Aus zeitlichen Gründen wurde bereits im Sept. 2008 das Forschungsvorhaben an die Technische Universität Bergakademie Freiberg, Institut für Geotechnik, Lehrstuhl für Gebirgs- und Felsmechanik/Felsbau vergeben. Seit Sept. 2011 arbeitet neu eingestelltes Forschungspersonal in Hamburg an dem FuE.

3 Ergebnisse

Von der TU Freiberg wurden Generierungsalgorithmen für die realistische Abbildung von Deckwerksteinen und deren Massenverteilung entwickelt (Bild 1).

Die Kopplung von PFC3D mit CCFD wurde erfolgreich durchgeführt und auf Plausibilität geprüft. Erste Wellen- und Strömungsbelastungen können grundlegend im CCFD abgebildet werden. Die Simulation von Wellenbelastungen erfolgt derzeit über die Initialisierung einer Wassersäule im Modell, welche im

Folgendes zeigt eine auf das Deckwerk auflaufende Welle erzeugt. Es wurden verschiedene Szenarios mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen und resultierendem Wellenangriff untersucht und die Reaktionen am Deckwerk betrachtet (Bild 2). Das Modell wurde außerdem dahingehend geändert, dass im Bereich des Wellenaufbaus mittels Messpegel das erzeugte Wellenspektrum visualisiert wird. Die Simulation von Schiffs- und Windwellen ist weiter zu präzisieren.

Bei der Simulation von uferparallelen Tideströmungen wird ein breiteres Modell als in Bild 2 verwendet, um die Strömung sanfter auf das Deckwerk zu lenken. Der hierdurch steigende Rechenaufwand wird dadurch kompensiert, indem zunächst nur das Deckwerk im unteren Bereich der Böschung detailliert abgebildet wird, wo der maßgebende Belastungsfall der Tidekenterung von Niedrig- zu Hochwasser stattfindet. Die erforderlichen Anfangsrandbedingungen sind weiter herauszuarbeiten.

Die Simulation von unterschiedlichen resultierenden Grundwasserpotentialen im unterlagernden Boden infolge wechselnder Tidewasserstände wurde mit FLAC3D durchgeführt. Die in der Zwischenschicht Deckwerkssteine – Filterschicht wirkenden Kräfte werden vom FLAC3D auf die Deckwerkssteine im PFC3D angesetzt und interagieren somit mit den Deckwerksteinen. Die mögliche Kopplung aller drei Programme würde derzeit in unzumutbar langen Rechenzeiten resultieren.

Im Rahmen einer Projektbearbeitung für das WSA Hamburg wurden hydraulische sowie geotechnische Messungen mit videometrischen Aufzeichnungen von Schiffswellen mit Genehmigung des WSA Hamburg am Deckwerk der Elbinsel Lühesand ergänzt. Diese Daten dienen als Grundlage für Schiffswellensimulationen mit dem CCFD sowie als Eingangsgröße für die anvisierte Deckwerksbemessung mit dem numerischen Modell.

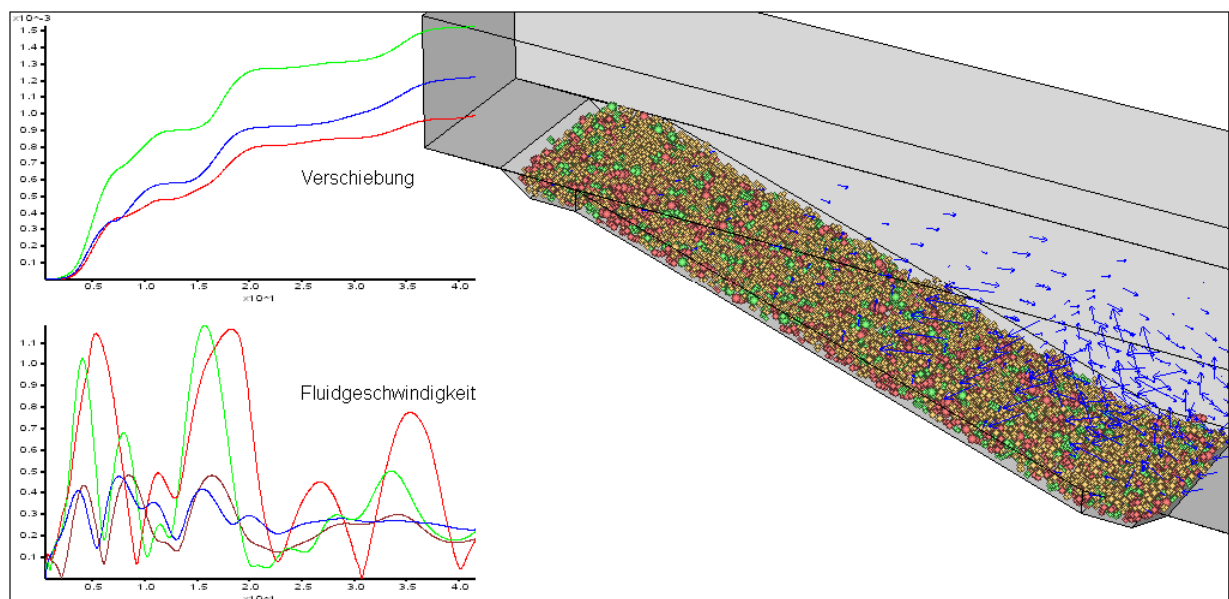


Bild 2: Wellenbelastung am Deckwerk und Reaktion einzelner Deckwerksteine

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Präzisierung der Simulation von Schiffswellen und Tideströmung; Modellversuche zur Kalibrierung der numerischen Deckwerkssteine; Entwicklung eines Messsystems zur Erfassung der Lageänderung und Beschleunigung von Deckwerkssteinen in allen drei Raumrichtungen; Instrumentierung von Deckwerkssteinen und Einbau in bestehende Deckwerke; Datenanalyse und numerische Simulation der Ereignisse und Reaktionen

2013: Fortführung der Naturmessungen mit instrumentierten Deckwerksteinen und deren numerische Simulation

- 2014: Simulation von überströmten Bühnen im Tidegebiet unter Verwendung von Messdaten an der Tideelbe; Simulation der sich bildenden Porenwasserüberdrücke im anstehenden Boden infolge von Absunkereignissen mit FLAC3D und Übergabe der Randbedingungen an PFC3D (partielle Auflösung der Mineralkornfilterschicht in Partikel mit PFC3D)
- 2015: Ermittlung der optimalen Deckwerksteinformen, -größen, -massen, -verteilungen, Deckschichtdicken, Fußstützungsarten und die Arten des Deckwerkbaus für charakteristische Randbedingungen in den Ästuaren durch Parametervariationen und Programmerweiterungen..

Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen

Netzplan-Nr.: A39550170318

Projektleiter: Dr.-Ing. M. Pohl, Dienststelle Hamburg, Referat Geotechnik Nord (K1)

E-Mail: martin.pohl@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

Die Deichabdeckung weicht in Abhängigkeit des Deichbaumaterials, der Einbaubedingungen, der Bodenstrukturbildung (Risse, Bioturbation, Alter), Einbauten, des Zustands der Grasnarbe, der Zeit und Höhe des hydraulischen Ereignisses, vorhergehender meteorologischer Ereignisse sowie Aufsättigung des Deichkerns unterschiedlich stark auf, was zu einem Deichversagen führen kann. Des Weiteren wirken im Sturmflutfall Wellenangriff und Wellenüberlauf auf die Grasnarbe und die Deichabdeckung, wodurch diese erodieren kann. Der Einfluss aller Faktoren und die jeweiligen Abhängigkeiten sollen im Feld bzw. im Labor ermittelt und in einem numerischen Modell zusammengeführt werden. Durch die Verwendung eines numerischen Modells, können sich Versagensmechanismen frei entwickeln und sich überlagernde physikalische Phänomene zusammen berücksichtigt werden.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Ausbildung von Deichen geschieht derzeit auf der Grundlage von Erfahrungswissen sowie physikalischen Modellansätzen und analytischen Gleichungen. Analytische Nachweisführungen bestehen für verschiedene einzelne Versagensmechanismen. Derzeitig werden einzelne Aspekte für die Widerstandsfähigkeit von Deichen unabhängig von einander untersucht, wie z.B. die Rissentwicklung, der Einfluss der Grasnarbe auf den Erosionswiderstand sowie die Erosion des Deichbaumaterials. Aus den Untersuchungen werden Empfehlungen und analytische Ansätze abgeleitet. Einzelne ungekoppelte numerische Verfahren zur Simulation von morphodynamischen und hydraulischen Prozessen werden verwendet.

Eine ganzheitliche Betrachtung aller Aspekte findet derzeit nicht statt. Durch eine numerische mechanisch-hydraulisch gekoppelte Modellierung eines Deichquerschnittes mit seinen charakteristischen Eigenschaften (Deichbaumaterial, Bodenstruktur, Jahreszeit, Grasnarbe) unter der Einwirkung eines hydraulischen Ereignisses (Sturmflut, Starkregen, Einwirkungsdauer) ist eine Bemessung möglich, die alle Versagensmechanismen beinhaltet. Deichschäden und potentielle Gefährdungsbereiche können über eine Parametervariation ermittelt und Deichverstärkungsmaßnahmen bewertet werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Für den Festlandschutz sind funktionstüchtige und widerstandsfähige Deiche gegenüber den Einwirkungen aus Sturmfluten - vor dem Hintergrund eines säkularen Meeresspiegelanstiegs - unerlässlich. Im Rahmen der Unterhaltung von Bundeswasserstrassen fallen große Mengen an Baggergut an. In Kenntnis des säkularen Meeresspiegelanstiegs sind Deichverstärkungsmaßnahmen erforderlich. Die Entnahme von Klei und Mergel ist häufig mit rechtlichen und ökologischen Schwierigkeiten versehen, so dass sich die Verwendung von Baggergut als Deichbaumaterial anbietet. Zur Bewertung zu verstärkender Deichquerschnitte mit Baggergut (Kubatur, Zusammensetzung) auf bestehenden Klei- oder Mergeldeichen sollen physikalische und numerische Untersuchungen vorgenommen werden.

Beim Ausbau der Bundeswasserstrassen im Tidebereich werden Deichschäden sowie Schäden im Hinterland häufig auf die Ausbaumaßnahmen zurückgeführt. Durch eine numerische Simulation sollen auftretende Schäden und verursachende Mechanismen untersucht werden. Die Ursachen können benannt und somit verhindert werden.

1.3 Untersuchungsziel

Mit Feld- und Laboruntersuchungen sowie numerischen Simulationen sollen die Widerstände von Deichen (sowie Deichverstärkungen) den hydraulischen Belastungen gegenübergestellt werden und somit letztendlich die Ermittlung der Widerstandsfähigkeit des Deiches inkl. der Ermittlung der Schwachstellen ermöglichen.

2 Untersuchungsmethoden

Anhand von Untersuchungen an bestehenden Deichen sowie an einem neu zu errichtenden Deich unter definierten Bedingungen soll der Einfluss von Alterungsvorgängen (Strukturbildung) und Wasserbelastung auf die Scherfestigkeit sowie Durchlässigkeit der Deichabdeckung ermittelt werden. An einem neu zu errichtenden Deich unter definierten Bedingungen sollen Untersuchungen durchgeführt werden, um prinzipielle Aussagen zu erhalten und die sonst üblichen - durch Inhomogenitäten - auftretenden Streubreiten bei bestehenden Deichen zu reduzieren.

Felduntersuchungen:

Zur Simulation von erhöhten (stationären) Wasserständen im Sturmflutfall wird auf der seeseitigen Böschung oder Deichkrone über geeignete Behältnisse eine Wasserauflast von bis zu 3 m erzeugt. Zu verschiedenen Zeitpunkten (nach 0 – 4 – 8 – 24 Stunden) werden Sonderproben über die Tiefe der Deichabdeckung entnommen. Diese werden anschließend im bodenmechanischen Labor untersucht. Während der Wasserbeaufschlagung werden die Infiltrationsraten protokolliert, wodurch die in situ Durchlässigkeiten unter Berücksichtigung der Strukturbildung ermittelt werden.

Zur Erfassung der zeitabhängigen Strukturbildung ist derzeit eine Versuchsdauer von 10 Jahren vorgesehen. In Beprobungsintervallen von 0 – 1 – 3 – 5 – 10 Jahren sollen zu den Jahreszeiten Herbst, Frühjahr und Sommer die o.g. Untersuchungen durchgeführt werden.

Laboruntersuchungen:

Die entnommenen Sonderproben werden in Triaxialversuchen - mit dem durch die Feldversuche eingestellten Wassergehalt – dräniert, ohne back-pressure mit geringen Konsolidationsspannungen (10 - 30 - 60 kPa) abgeschert. Des Weiteren sind Kompressionsversuche mit Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit durchzuführen. Somit werden alle wassergehaltsabhängigen Parameter für eine spezifische Deichabdeckung für die numerische Modellierung ermittelt.

Numerische Simulation:

Der Deichquerschnitt wird mit einem drei-dimensionalen Finite Differenzen Programm (FLAC3D) simuliert. Somit sind Berechnungen bei großen Dehnungen möglich, um Versagensmechanismen sowie deren Verlauf ermitteln zu können. Zur Erfassung der hydraulischen und bodenmechanischen Vorgänge wird die Simulation mechanisch-hydraulisch gekoppelt durchgeführt. Die Spannungs-Dehnungs-Kurven (Bild 2) aus den Triaxial- und Kompressionsversuchen in Abhängigkeit der Dauer der hydraulischen Beanspruchung und weiterer Randbedingungen (Bodenart, Alter, ...) werden im Programm hinterlegt, um die Entwicklung der Scherfestigkeiten und Durchlässigkeiten realistisch zu erfassen. Somit wird die Aufweichung auch infolge Wassereinstau im Deichkern oder stärkerer Infiltrationen durch Sandnester oder Wühlgänge berücksichtigt. Eine Durchsickerung des Deiches gemäß dem Ereignis und eine Änderung der Gebrauchstauglichkeit / Standsicherheit sind das Ergebnis der numerischen Simulation. Inhomogenitäten des Deichbaumaterials und des unterlagernden Bodens können durch eine Gauß-Verteilung der Bodenkennwerte berücksichtigt werden. Die Grasnarbe wird durch entsprechende Parameterzuweisung der Netzbereiche simuliert. Erosionsvorgänge der Grasnarbe und der Deichabdeckung sollen durch Auflösen des Kontinuums im entsprechenden Bereich und dem Ersetzen durch ein Diskontinuum (PFC3D) simuliert werden.

3 Ergebnisse

Im November 2011 konnten durch Genehmigung des Landesbetrieb für Küstenschutz, Nationalpark und Meeresschutz Schleswig-Holstein (LKN-SH) an einem aus Mergel bestehenden Altdeich sowie Neudeich die o.g. Untersuchungen durchgeführt werden.

Die in situ Wasserinfiltrationen mit einem Doppelring-Infiltrometer hatten zum Ergebnis, dass der Altdeich eine Durchlässigkeit zwischen $1E-6$ und $3E-5$ m/s aufweist, wohingegen die vorwiegend ermittelten Durchlässigkeitswerte beim Neudeich geringer als $1E-7$ m/s waren (Bild 1). Demzufolge besitzt der Altdeich aufgrund seiner bereits erfahrenen Strukturbildung eine höhere Durchlässigkeit.

Im Anschluss an die verschieden lang durchgeführten Infiltrationsversuche wurden Sonderproben entnommen. An einigen der Proben wurden bereits Triaxialversuche durchgeführt. Prinzipiell ist der-

zeitig feststellbar, dass die Krafterfassung des trockenen Mergels (Bild 2 - gelbe Kurve) höher ist als die des Mergels mit einer Wasserauflast von 4 Stunden (grüne Kurve) und bei vollständiger Wassersättigung (Versuch mit back pressure - blaue Kurve). Aus der Heterogenität des Deichbaumaterials ergibt sich eine gewisse Streubreite.

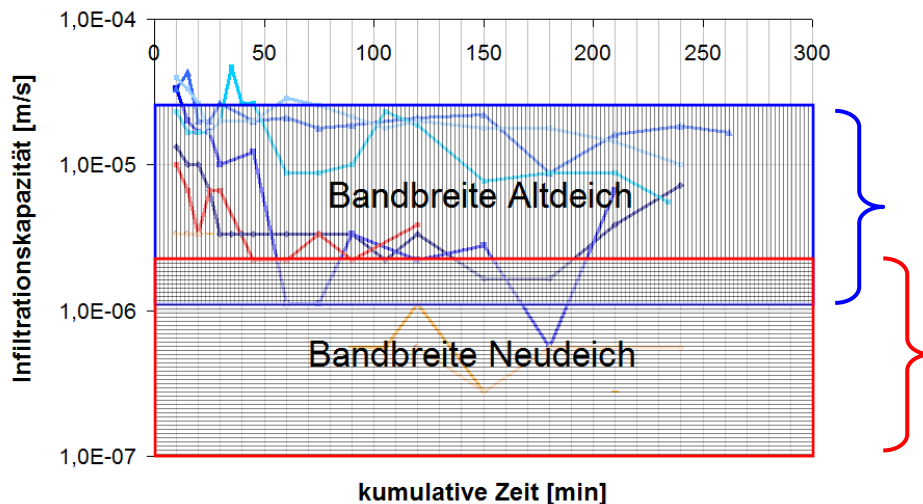


Bild 1: *Ermittelte in situ Durchlässigkeiten an Mergeldeichen*

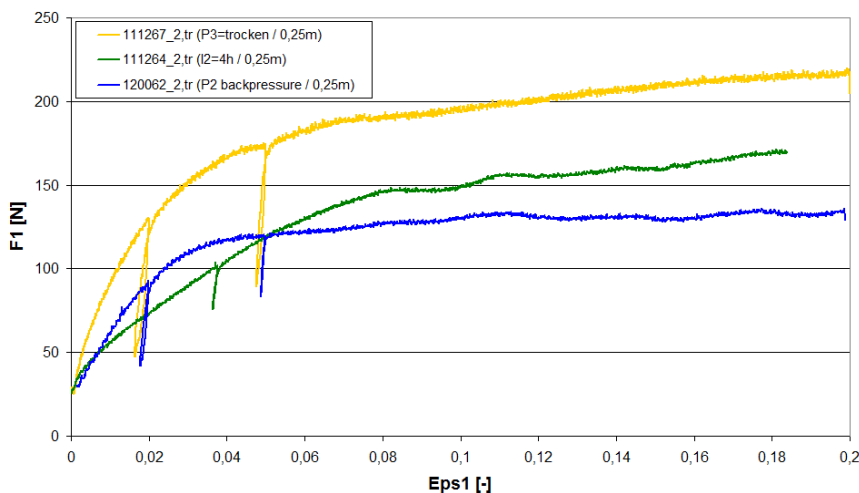


Bild 2: *Ermittelte Scherfestigkeiten von Mergelproben aus dem Altdeich, Tiefe 0,25 m*

Die Kraft-Dehnungs-Kurven werden im numerischen Modell der entsprechenden Tiefenlage und Wassereinwirkungsdauer zugewiesen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Weitere Infiltrationsversuche und Probenahmen an den o.g. Mergeldeichen

Planung und Neubau eines Deiches unter definierten Randbedingungen; Weiterentwicklung des numerischen Modells - Hinterlegung der Bodenzustandsparameter

2013-2016: Untersuchungen an bestehenden Deichen (Mergel, Klei, Baggergut) sowie an dem neu zu errichtenden Deich

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

Pohl, M.: Reliability Models for Dikes in Germany, Understanding Dike Safety Course, Deltares / ISSMGE TC201, Delft, 25.05.2011

Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße - Schiffsdynamik

Netzplan-Nr.: A39550210055

Projektleiter: Dr.-Ing. K. Uliczka, 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 Tideästuarre 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 erarbeitet u.a. Basisdaten zum fahrdynamischen Verhalten sehr großer Containerschiffe bei Revierfahrt (z.B. Squat, Trimm) sowie zur Wechselwirkung dieser großen Fahrzeuge mit verschiedenen Uferböschungen (z.B. abstands- und neigungsabhängige Querkräfte und Giermomente infolge des Bank-Effekts). Die jeweils parallel mit zu erfassenden schiffserzeugten Wasserspiegelauslenkungen (Schiffswellen) und Strömungen ermöglichen eine ganzheitliche Betrachtung der physikalischen Prozesse bei der Revierfahrt eines großen Fahrzeugs.

Abgesicherte, quantitative Prognosen des dynamischen Fahrverhaltens (Squat und Trimm) im seitlich begrenzten, extremen Flachwasser sind mit der Methode des hydraulischen Modellversuchs in einem fachlich hinreichenden Maßstab gewährleistet. Des Weiteren sind derzeit validierte und international anerkannte hydrodynamisch-numerische RANSE-Verfahren als gleichwertig zum Modellversuch zur abgesicherten Bearbeitung der Aufgabenstellung anzusehen. Potentialtheoretische Verfahren wurden im Auftrag der BAW für derartige Fragestellungen weiterentwickelt, sind 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 Ausbaupkapazität der Seeschiffahrtsstraßen wird zukünftig deren Befahrbarkeitsanalyse für eine optimale Nutzung durch die Schiffahrt eine wachsende Bedeutung hinsichtlich der Schiffsdynamik, aber auch bezüglich der wirtschaftlichen Unterhaltung der Schiffahrtsstraßen (z.B. schiffserzeugte Belastungen der Ufer) bekommen. Eine detaillierte Kenntnis u.a. der Schiffsdynamik (Squat, Trimm 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 durch die BAW und die Beauftragung der Weiterentwicklung vorhandener mathematischer, potentialtheoretischer Verfahren auf Basis dieser Daten.

Weiterhin sind die schiffsspezifischen Squat- und Trimmwerte, Querkräfte und Giermomente 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 (in diesem Projekt potentialtheoretische Verfahren) validiert und deren Weiterentwicklung beauftragt. 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 sowie der umfangreichen Wissensbasis über die Vielfalt der Schiffsentwürfe kam für eine Weiterentwicklung des potentialtheoretischen Verfahrens FS-Flow (vergl. 2009) weiterhin die zur Klassifizierungsgesellschaft Germanischer Lloyd AG (GL), Hamburg gehörende Firma FutureShip, Potsdam in Betracht. Dabei waren Regressionsanalysen zwischen potentialtheoretischen und RANSE-Verfahren auf Basis unabhängiger Variablen hinsichtlich verwertbarer Korrelationsansätze zur schnellen Variantenbewertung für Belange der WSV zu prüfen.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse der in 2010 beauftragten Untersuchungen der Firma FutureShip zur Validierung hydrodynamisch-numerischer Berechnungsverfahren wurden im Bericht „Berechnung zur Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße mit dem Potentiallöser FS-Flow“ aufbereitet und bewertet (FutureShip, 2010). Nach ersten teils erfolgversprechenden Berechnungen in 2009 für Querschnittsverhältnisse von $n=20$ und $n=10$ waren im Rahmen dieses Projekts Passagen eines PanMax-Containerschiffs für extrem enge Querschnittsverhältnisse von $n=3,8$ entsprechend der Seeschiffahrtsstraße Nord-Ostsee-Kanal (Oststrecke) beauftragt worden.

Bei der Bearbeitung des Forschungsauftrags in 2011 war folgendes Vorgehen vereinbart:

- Berechnungen für ein Containerschiff in einem breiten sowie in einem extrem engen Trapezprofil gemäß vorgegebener Matrix (Variablen: Querprofil, Schiffsgeschwindigkeit, Schiffstiefgang).
- Vergleich der Berechnungsergebnisse aus dem potentialtheoretischen Verfahren FS-Flow und dem RANSE-Verfahren FS-FOAM mit ausgewählten Messungen.
- Regressionsanalysen zwischen den Berechnungsergebnissen aus potentialtheoretischen und RANSE-Verfahren.

Für die WSV kann aus dem Projektergebnis die Erkenntnis abgeleitet werden, dass eine direkte Berechnung des fahrdynamischen Verhaltens von Schiffen für geometrisch einfache Querschnitte mit potentialtheoretischen Berechnungsverfahren (hier: FS-Flow) bei dem derzeitigen Entwicklungsstand für die Belange der WSV am NOK nicht empfohlen werden kann. Berechnungen nach Stand von Technik und Wissenschaft mit rechnerisch und zeitlich aufwändigen, hochauflösenden, reibungsbehafteten RANSE-Modellen (hier: FS-FOAM) wurden für die Tauchung (Squat) und den Trimm anhand von Messergebnissen aus hydraulischen Modellversuchen der BAW mit hinreichendem Maßstab validiert (Bild 1).

Erste Korrelationsbetrachtungen zwischen Ergebnissen aus potentialtheoretischen und RANSE-Verfahren anhand eines multiplen linearen Regressionsansatzes zeigen scheinbar plausible Ergebnisse, die jedoch auf Basis weiterer „Stützpunkte“ abgesichert werden müssen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Mit der Firma FutureShip wurden mögliche weitere Entwicklungsschritte u.a. in Bezug auf Skalierungseffekte bei Berechnungen von Modell- und Großausführung sowie hinsichtlich einer verlässlichen Regressionsanalyse diskutiert.

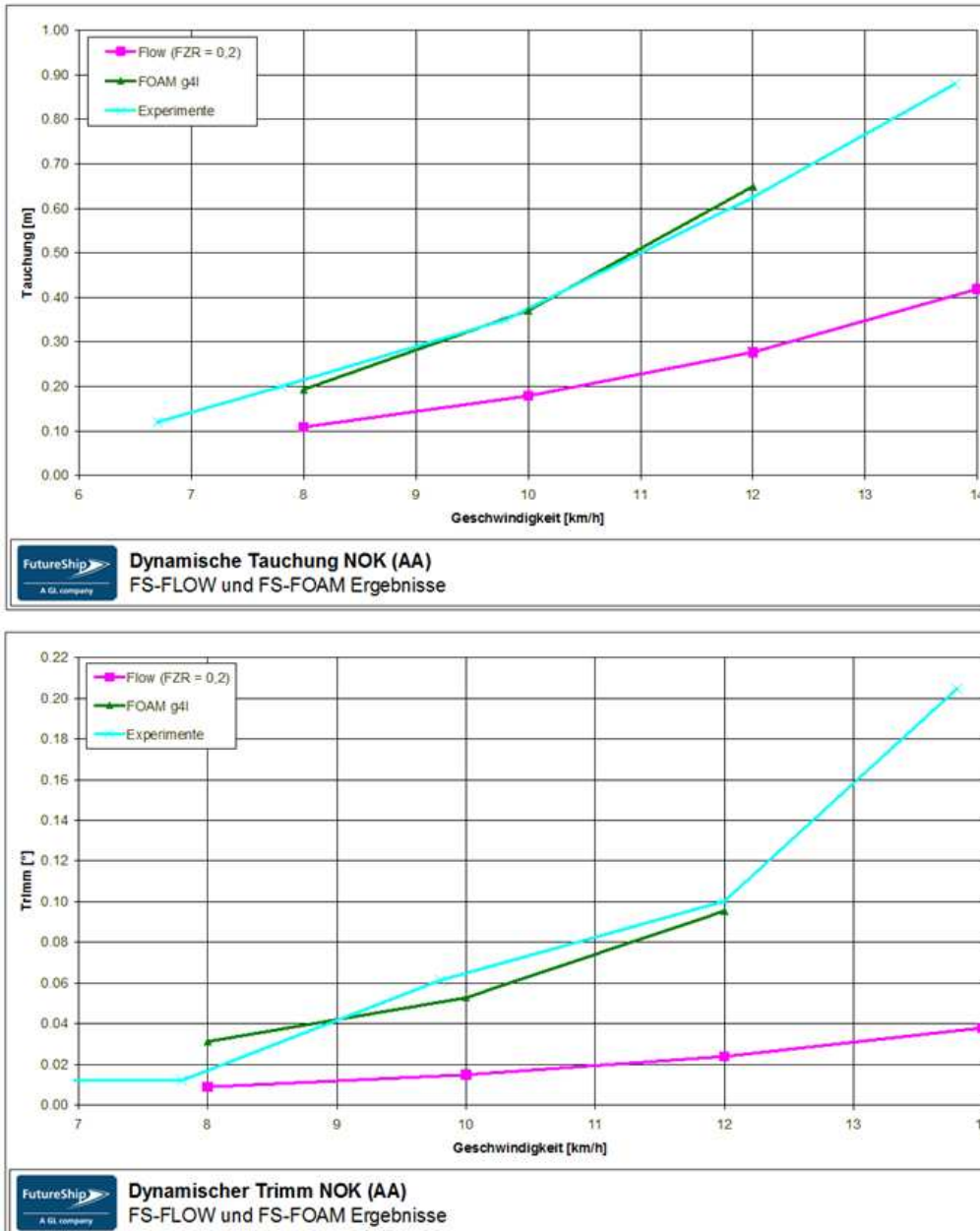


Bild 1: Geschwindigkeitsabhängige dynamische Tauchung (oben) und dynamischer Trimm (unten) aus Berechnungen mit FS-Flow, FS-FOAM und Messungen im hydraulischen Modell (Maßstab 1:40) für den Kanalfall NOK ($n=3,8$; nach FutureShip 2011)

5 Literatur

- / -

6 Veröffentlichungen

FutureShip (2011); Bereitstellung eines „schnellen“ HN-Werkzeugs zur Variantenbewertung bei Voruntersuchungen von Ausbauplanungen an Seeschiffahrtsstraßen – Pilotstudie, Bericht Nr. 441-04-01 Version 1/2011-11-28, Version 4/2012-01-23, FutureShip, Potsdam 2011

MudSim: Numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlick (MudSim-B)

Netzplan-Nr.: A39550210093

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

Bearbeiterin: Dipl.-Ing. D. Wehr, Dienststelle Hamburg, Referat Ästuarsysteme I (K2)

E-Mail: harro.heyer@baw.de, denise.wehr@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 wurde im Zeitraum von Okt. 2007 bis Okt. 2010 als Forschungsprojekt des KFKI (Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen) durch das BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) 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 Flüssigschlick 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 unterteilt werden (siehe Bild 1). Diese Schichten gleicher Dichte, Isopyknen, bilden die vertikale Diskretisie-

ung im Modell. Jeder Isopykne wird ein bestimmtes rheologisches Verhalten (Newtonsches, nicht-Newton'sches Fluid) zugeordnet (siehe Bild 2).

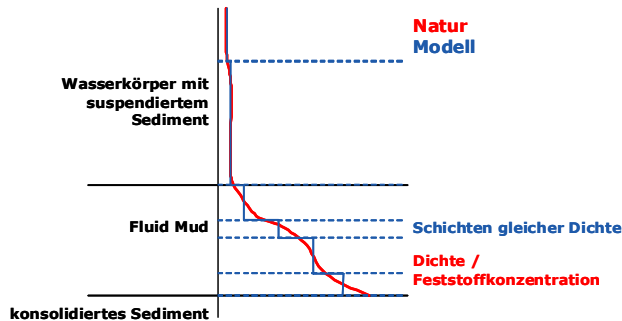


Bild 1: Schematische Darstellung der Dichteapproximation

Die Entwicklung des MudSim-Modells basiert auf einem hydrodynamischen isopyknischen Modell, welches von Prof. V. Casulli der Universität Trient, Italien, zur Verfügung gestellt wurde. Der konzeptuelle isopyknische Modellansatz ist besonders für die Modellierung stark geschichteter Strömungen geeignet.

Das isopyknische Modell ist um die entscheidenden Transportprozesse wie Deposition, behindertes Absinken, Konsolidierung, Entrainment und Fluidisierung sowie um rheologische Ansätze für Schlick-suspensionen zu erweitern (siehe Bild 2).

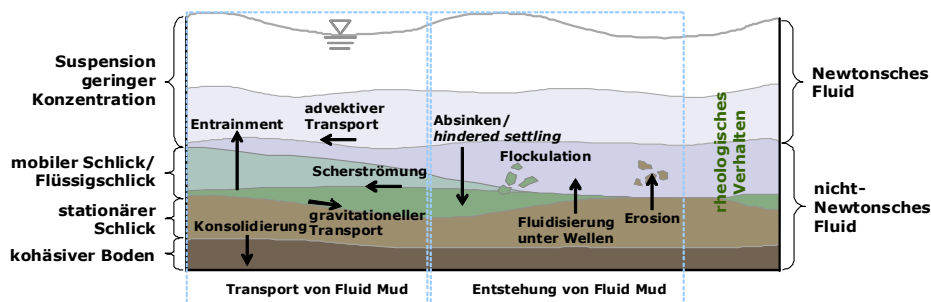


Bild 2: Schematische Darstellung der wesentlichen physikalischen Prozesse der Dynamik von Flüssigschlick

3 Ergebnisse

Die Schlicksuspensionen verschiedener Konzentration werden durch die Isopyknen mit entsprechender Dichte repräsentiert. Die Rheologie von Flüssigschlick wird über den Tensor innerer Spannungen im Modell realisiert. Durch rheometrische Laboruntersuchungen werden Zusammenhänge von Schubspannung und Scherrate sowie Schubspannung und Viskosität in Abhängigkeit von der Suspensionskonzentration ermittelt. Diese Zusammenhänge gehen über die scheinbare Viskosität in das numerische Modell ein. Vertikale Transportprozesse, wie Entrainment und behindertes Absinken von Schwebstoffpartikeln, werden durch Massenaustausch zwischen den Dichteschichten realisiert.

An verschiedenen Verifikationsstudien wurde die Funktionalität und Plausibilität der Abbildung der implementierten physikalischen Prozesse überprüft. Das numerische Verfahren ist auf ein Ausschnittsmodell der Unterems für den Bereich Rhede bis Herbrum angewendet worden. Der Fluid Mud Transport wird hier wesentlich durch die Tide und das Oberwasser beeinflusst. Eine Variation des Oberwassers zeigt, dass der mobile Schlick bei hohem Oberwasser weniger stark stromauf transportiert wird, siehe Bild 3. Aufgrund der isopyknischen Diskretisierung können die Schlickschichten bodennah hoch aufgelöst werden und ein stark geschichteter Transport wird somit ermöglicht. Je höher die Schlickkonzentration wird desto größer wird die scheinbare Viskosität und das Fließverhalten wird entsprechend träger. In Bild 4 ist die Ebbeströmung dargestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit ist bodennah deutlich geringer aufgrund der Flüssigschlickschichten. Der vertikale Geschwindigkeitsgra-

dient an der Lutokline (Schichtgrenze mit sprunghafter Zunahme der Sedimentkonzentration und Feuchtdichte) wird deutlich.

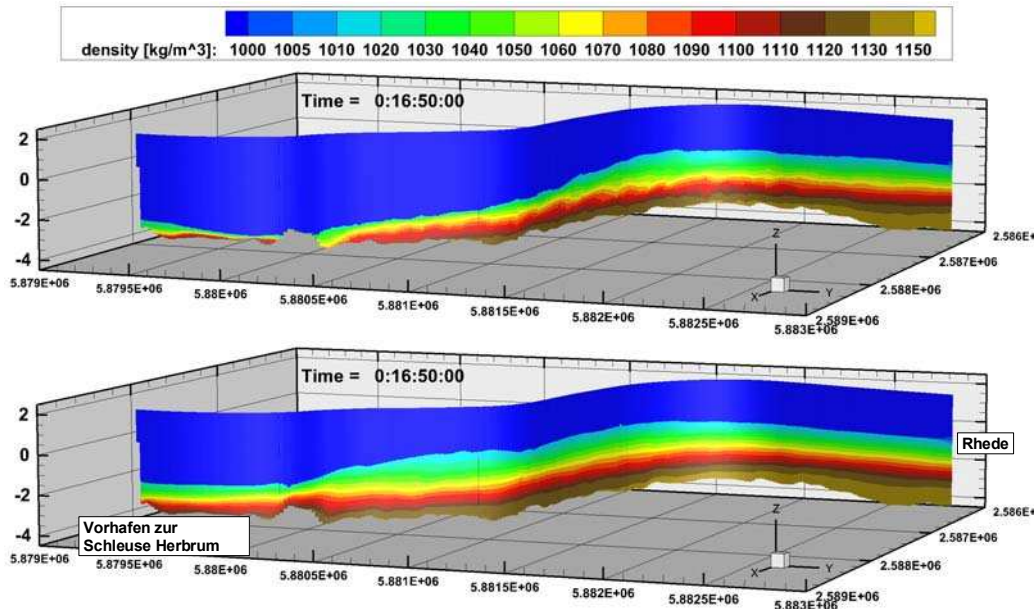


Bild 3: Simulationsergebnisse der Dichteverteilung im Längsprofil in Fahrinnen Mitte zur Kenterung von Flut zu Ebbe. Obere Graphik zeigt die Simulation mit hohem Oberwasser und untere Graphik mit niedrigem Oberwasser (dreidimensionale Darstellung)

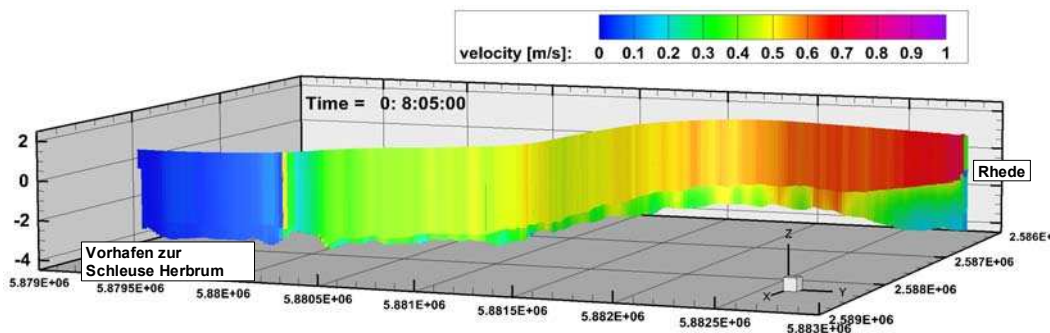


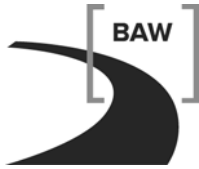
Bild 4: Simulationsergebnisse der Strömungsgeschwindigkeit im Längsprofil in Fahrinnen Mitte während der Ebbephase (dreidimensionale Darstellung, tiefengemittelte Strömung je Dichteschicht, Klarwasserkörper wird durch eine Dichteschicht abgebildet)

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

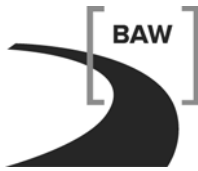
Weiterentwicklungen des numerischen Modells zur Simulation von Flüssigschlück werden auch nach Beendigung des KFKI-Forschungsprojektes MudSim-B: *Numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlück* (03KIS67) - fortgeführt.

5 Veröffentlichungen

- Knoch, D. und Malcherek, A.: A Numerical Model for Simulation of Fluid Mud with different Rheological Behaviors. *Ocean Dynamics*, 61:245-256, 2011.
- Wehr, D.: Fluid Mud Studies in the Ems Estuary with an Isopycnal Model Approach., 8th UnTRIM Workshop, May 9-11, 2011, Trento, Italien, Vortrag.
- Wehr, D.: Ein Ansatz zur Simulation der Fluid-Mud Dynamik - Beitrag zur Einordnung der Ergebnisse des FuE-Projektes MudSim. BAW-Kolloquium, 22. Sep. 2011, Hamburg, Vortrag. http://vzb.baw.de/digitale_bib/kolloquien.php?id=6d6eca0254a0e079756b048e820c3e5b



- Malcherek, A. und Cha, H.: Zur Rheologie von Flüssigschlick: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze. Projektbericht, Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Univerität der Bundeswehr München, Heft 111, 2011.
- Wehr, D.: An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics. Dissertation, Veröffentlichung geplant in Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Univerität der Bundeswehr München, 2012.



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

Netzplan-Nr.: A39550270116

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

E-Mail: harro.heyer@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

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

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

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

Prozesse auf Grundlage voneinander differierender Modellsysteme umfassend und nachvollziehbar eingeschätzt werden können.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

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

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

3 Ergebnisse

Um in der Lage zu sein, die morphodynamische Entwicklung naturähnlich zu berechnen, ist es zunächst erforderlich die Belastung der Gewässersohle durch die Gezeitenwirkung möglichst korrekt abzubilden. In Abbildung 1 ist dazu der Vergleich des Tidehubs zwischen den Mess- und Modelldaten entlang einer Transekte (die Nordsee gegen den Uhrzeigersinn umrundend) dargestellt. Für den Fokusbereich der Deutschen Bucht wird der Tidehub im Mittel für das Jahr 2006 auf ca. 40 cm genau berechnet. Die im Simulationsmodell entlang der niederländischen und belgischen Küsten gröber aufgelösten Bereiche zeigen noch einen größeren Verbesserungsbedarf auf. Es wird im Fortgang des Projekts untersucht, ob Verbesserungen durch Verfeinerungen des Modellgitternetzes erreicht werden können.

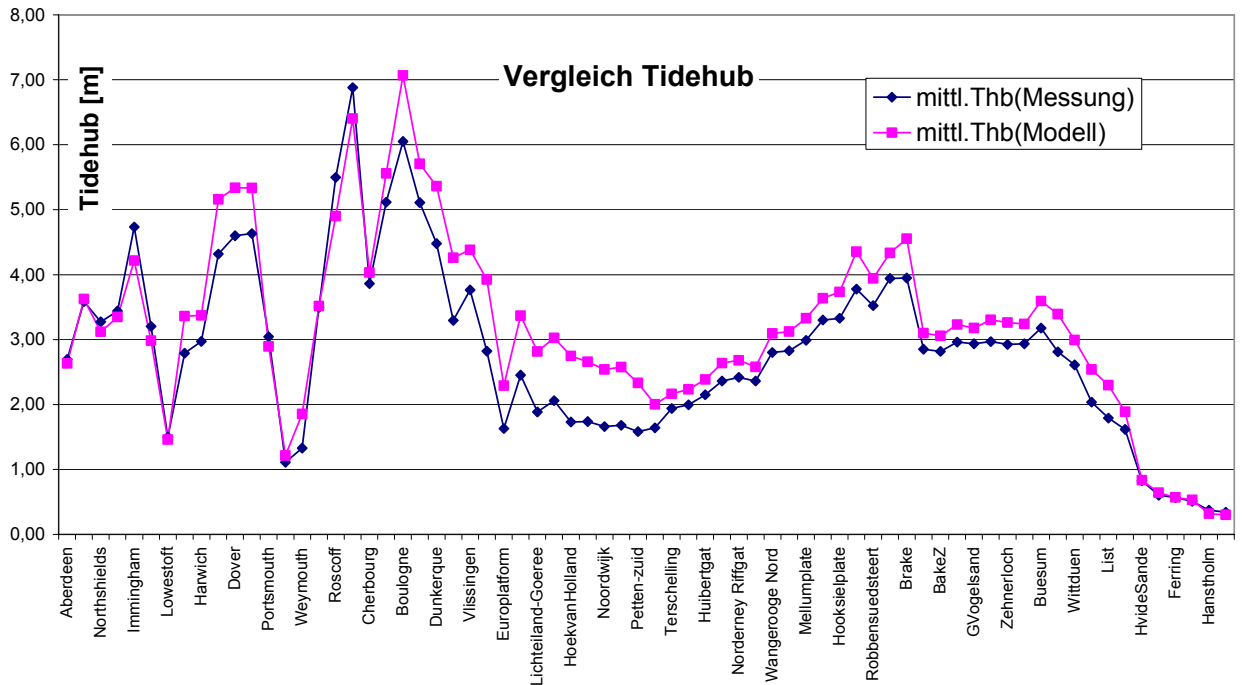


Bild 1: Vergleich des Tidehubs (Messung - Modell)

Aus der kombinierten Wirkung von Gezeiten, Seegang und windgetriebener Zirkulation wurden die morphologischen Veränderungen berechnet. In Abbildung 2 sind der Betrag der Tiefenänderung nach 6 Monaten Simulationszeit (links), sowie der maximale Betrag der Tiefenänderung auf der Basis von Peildaten im Zeitraum 1982-2008 aus Winter (2011) (rechts) dargestellt.

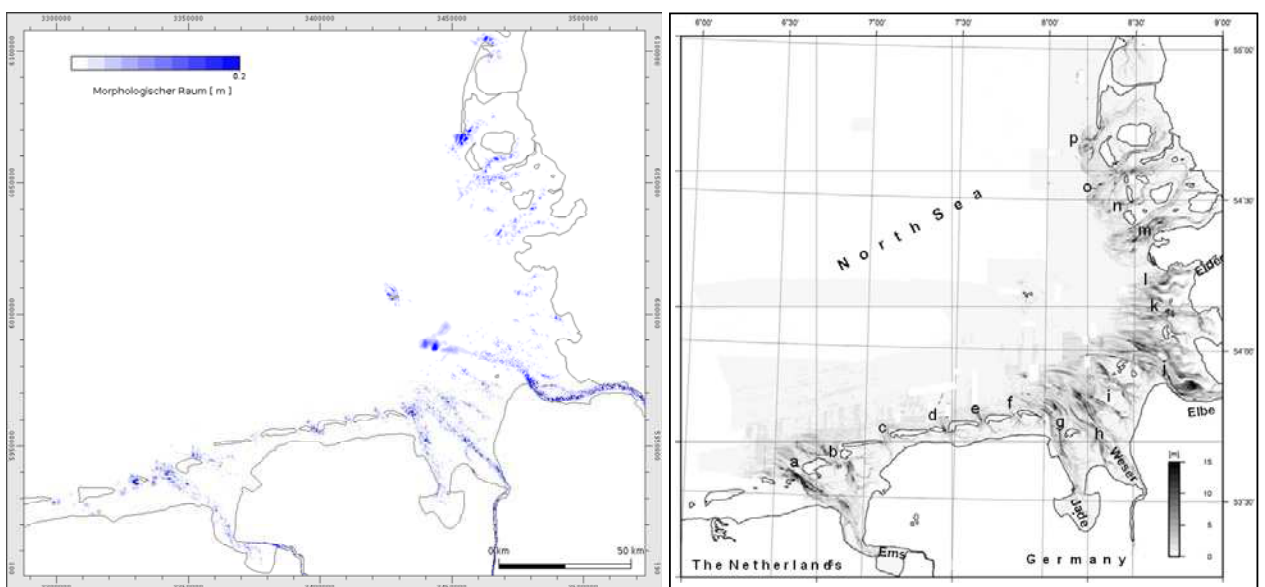


Bild 2: Maximaler Betrag der Tiefenänderung im numerischen Modell (links) und auf Basis von Peildaten (rechts)

Die im Projekt AufMod erarbeiteten Untersuchungsergebnisse werden in einer Datenbank offen für die Nutzung durch Dritte eingestellt und bilden somit die Grundlage zur Beantwortung weitergehender Fragestellungen im Bereich der Ästuare sowie der Bundeswasserstrassen. Die Recherche / Nutzung der Ergebnisse erfolgt über die im Rahmen des Forschungsprojektes NOKIS bereits aufgebaute Daten- und Informationsplattform. Erweitert wird der Zugriff durch das Forschungsprojekt 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. Beendigung des Vorhabens.

5 Literatur

Winter, C. 2011. Macro scale morphodynamics of the German North Sea coast. Journal of Coastal Research (57)

6 Veröffentlichungen

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

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

Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiffahrtsstraße: Schiffsführungssimulation der Revierfahrt

Netzplan-Nr.: A39550270132

Projektleiter: Dr.-Ing. C.-U. Böttner, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme I (K2)

E-Mail: carl-uwe.boettner@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Schiffsführungssimulatoren werden seit den 60er Jahren erfolgreich in der Aus- und Weiterbildung von nautischem Personal eingesetzt. Da seither die Schiffsgrößen kontinuierlich gesteigert werden, sind auch die Kosten für die Bereitstellung und Unterhaltung der Wasserstraßen überproportional gestiegen. Einsparungen sind nur möglich, indem der Dimensionierung der Seeschiffahrtsstraße ein hohes Gewicht eingeräumt wird und diese nur in den Dimensionen bereit gestellt wird, die tatsächlich nötig sind, um die geforderte Sicherheit und Leichtigkeit des Verkehrs zu gewährleisten.

Für die Bemessung bedeutet dies, dass ergänzend zu den bewährten Ingenieuransätzen und Richtlinien der tatsächliche Raumbedarf festgestellt werden muss. Hierfür muss zum einem die mathematisch numerische Simulation der Schiffsdynamik und zum anderen die Schiffsführungssimulation eingesetzt werden. Der virtuellen Befahrung kommt eine ganz zentrale Bedeutung zu, wenn die Dimensionen auf das erforderliche Maß begrenzt werden sollen, da sie eine Überprüfung auf nautische Schwachstellen ermöglicht, die sonst möglicherweise erst nach Fertigstellung auffielen und deren Korrektur dann meist sehr kostspielig würde.

Um diese Funktion erfüllen zu können, muss der Schiffsführungssimulator das Verhalten und die Fahrdynamik des Seeschiffs nicht nur physikalisch ähnlich abbilden, wie es für eine Ausbildung gemäß STCW-95 vollkommen ausreichend ist, sondern mit hoher Präzision vorhersagen und berücksichtigen. Für die Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse sind alle Prozesse bei Fahrt im seitlich begrenzten Flachwasser von übergeordneter Bedeutung und somit im Simulator naturähnlich abzubilden, die sonst in der Ausbildung von nautischem Personal an einem Simulator nur als Phänomen spürbar und erfahrbar sein müssen.

Ziel dieses Vorhabens ist es daher, fahrdynamische Modelle bestehender Schiffsführungssimulatoren so zu verfeinern, dass sie für die Simulation der Revierfahrt von Seeschiffen erweitert und ergänzt werden. Dies soll nach Möglichkeit so erfolgen, dass die WSV diese Entwicklungen in einer Simulation zur Bemessung verwenden kann, ohne dafür in der Wahl des Simulators oder Simulatorbetreibers eingeschränkt zu sein.

1.2 Bedeutung für die WSV

Eine fachlich abgesicherte Möglichkeit zur verbesserten Ausnutzung der Seeschiffahrtsstraßen bietet ein immenses Einsparpotential bei den Unterhaltungskosten. Dabei muss im Vorfeld der Nachweis der Gewährleistung der Leichtigkeit und Sicherheit des Verkehrs trotz möglichst wirtschaftlicher Bemessung erbracht werden können, um erhöhte Folgekosten für nachträgliche Anpassung der Wasserstraße und Reparaturen durch Unfälle auszuschließen.

1.3 Untersuchungsziel

Ermittlung und Festlegung der notwendigen Präzision der fahrdynamischen Modelle in der Schiffsführungssimulation zur Absicherung der Bemessung. Parallel dazu Entwicklung von Modellen und Ansätzen der Fahrdynamik von Seeschiffen bei Flachwasserbedingungen entsprechend den ermittelten Vorgaben und deren Bereitstellung zur Einbindung in Schiffsführungssimulationen zur Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse.

2 Untersuchungsmethoden

Es werden verschiedene Methoden verfolgt und eingesetzt. Zunächst wird eine Sensitivitätsstudie zur Bedeutung der unterschiedlichen Anteile der Fahrdynamik für die Bemessung der Wasserstraße durchgeführt. Hier werden die einzelnen fahrdynamischen Größen und Effekte gemeinsam mit der jeweiligen notwendigen Genauigkeit für eine belastbare, wirklichkeitstreu Simulation der Revierfahrt ermittelt. Daraus ergeben sich direkt die Aufgaben für die Entwicklung der einzelnen analytischen Ansätze und fahrdynamischen Modelle. Im letzten Schritt werden diese in Form von Modellmodulen zur Verwendung bei Simulationen der Revierfahrt in Schiffsführungssimulatoren aufbereitet und der WSV bereitgestellt. Die Entwicklung der analytischen Ansätze und fahrdynamischen Modelle baut auf den Ergebnissen (in Form von Validierungsdaten und analytisch funktionalen oder tabellarischen Eingabewerten) der beiden anderen Teilprojekte der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiffahrtstraße auf.

3 Ergebnisse

Die in 2010 begonnenen **Sensitivitätsstudien** zum Bank Effekt wurden fortgeführt. Die vom Hersteller nachgebesserte Variante des envman (Programmteil des Simulators), die Anfang Februar an alle Betreiber verteilt wurde und damit als Status quo angesehen werden kann, zeigt weiterhin geringe Abweichungen bei sehr dicht aufeinanderfolgenden Tiefenlinien, deren Einfluss auf Simulationsausagen wie Bemessungen oder Befahrbarkeit dabei allerdings als gering einzustufen ist. Auf Basis dieses Softwarestands ist der nächste Schritt nun die Bedeutung der eingestellten Parameter auf eine Bemessung und Befahrbarkeit zu ermitteln. Hiermit wurde in 2011 begonnen und die Untersuchungen werden weiter fortgeführt.

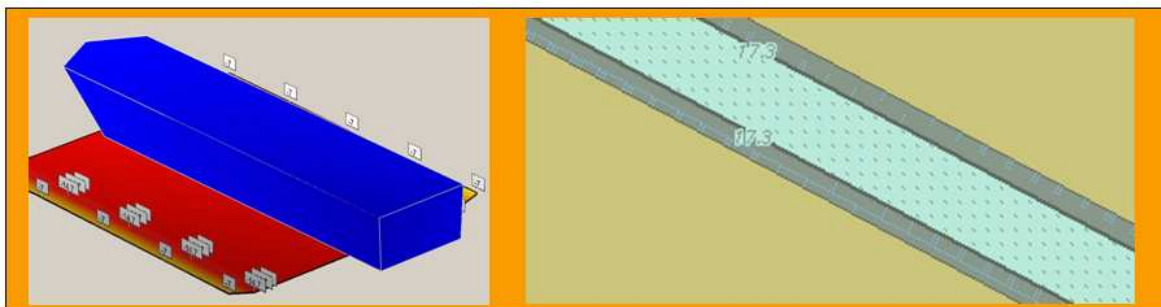


Bild 1: *Sensitivitätsuntersuchung zu Bankabständen und Bankkräften, links Visualisierung der ermittelten Abstände, rechts die elektronische Seekarte (ENC) mit der Teststrecke*

Ein Ziel besteht in verfeinerten Modellen zur Fahrdynamik im begrenzten Fahrwasser. Diese Modelle sollen über die Plug-In Schnittstelle des Simulators Betreibern ähnlicher Anlagen zur Verfügung gestellt werden. Hierfür wurden im Anschluss an eine im Haus durchgeführte Schulung Plug-Ins erstellt. Das erste Plug-In erhöht die Ruderwirkung und dient zu Testzwecken und Sensitivitätsstudien. In einem hierfür erstellten interaktiven Bedienerfenster (GUI) kann der Faktor für die Ruderwirkung bei laufender Simulation verändert werden. Zwei weitere Plug-Ins betreffen direkt die besonderen Bedingungen der Revierfahrt. Sie ermitteln jeweils das aktuelle Endverhältnis aus der zugrundeliegenden elektronischen Seekarte und modifizieren in dem einen Fall den Längswiderstand und in einem anderen den Squat samt Trimmwinkel. Diese Arbeiten konnten nicht weitergeführt werden, da die derzeitige Plug-In Schnittstelle nur beschränkten Zugriff auf die aktuellen Simulationsvariablen erlaubt. Für die Entwicklungen der Plug-Ins musste auf die shared-memory-Schnittstelle ausgewichen werden. Die Verwendung beider Schnittstellen in einer laufenden Simulation ist für Simulationsläufe zur Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse keine sinnvolle Lösung. Die Interaktion der beiden Schnittstellen läuft nicht reibungsfrei und das shared-memory Interface wird bei einigen Betreibern zur Datenaufzeichnung und –analyse eingesetzt. Zusätzlich lassen sich auch auf diesem Wege nicht alle benötigten Eingriffe in die Fahrdynamik des Simulators vornehmen. Es wurde daher angestrebt, entsprechende Nachbesserung vom Hersteller zu fordern. Ein Konzept zu den Anforderungen an die Plug-In Schnittstelle aus der Sicht dieses FuE-Vorhabens wurde im November fertig gestellt und weitergeleitet.

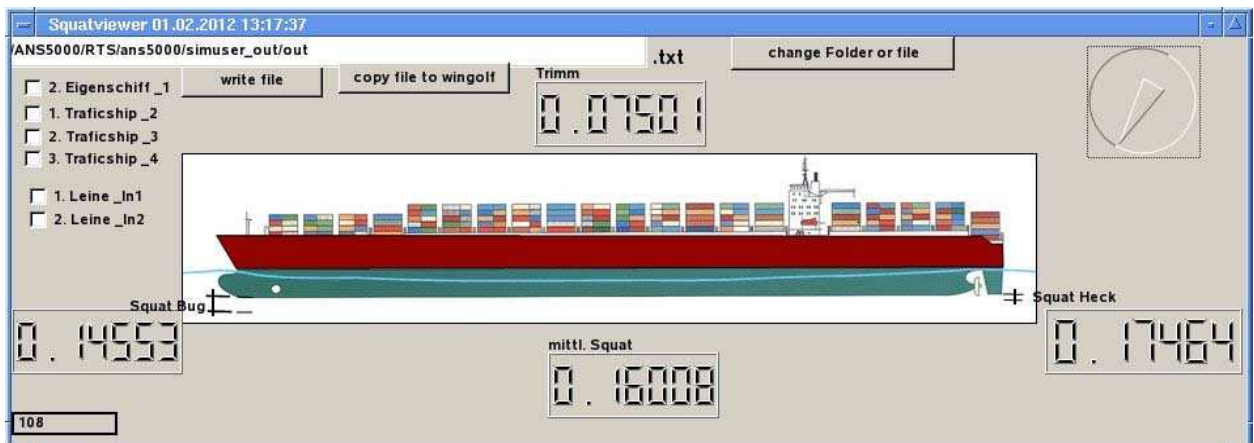


Bild 2: Bedienerfenster (GUI) mit der Darstellung der aktuellen Squatwerte in einer laufenden Simulation

Die Modellflotte konnte u.a. im Rahmen von WSV-Projekten erweitert werden: zum einen um einen Tanker in BalticMax-Dimensionen aus einer Simulation am Seekanal Rostock, durchgeführt durch das Maritime Simulationszentrum Warnemünde (MSCW) in Rostock und zum anderen um das nun fertig gestellte Schiff (Massengutschiff, Modellschiff MG32, der BAW) aus einer Diplomarbeit an der Hochschule Bremen, betreut an der BAW [Sponholz, J., 2011].

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Ein Schwerpunkt der Forschungstätigkeit im nächsten Jahr werden neben den weiterhin nötigen Sensitivitätsstudien die Erstellung und Erprobung von Plug-Ins darstellen. Schwerpunkt wird hier auf einer Erweiterung der Abhängigkeiten der fahrdynamischen Größen um das Endverhältnis sein. Hierzu ist eine Revision der derzeitigen Plug-In Schnittstelle erforderlich.

5 Literatur

Sponholz, J.: „Optimierung der Flachwasser -Manöviereigenschaften eines Schiffsmodells des Ship Handling Simulators, auf Grundlage einer Serie von Versuchsfahrten mit einem Maßstabsmodell“ Diplomarbeit, Hochschule Bremen, 2011

Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiffahrtsstraße: Schiffshydrodynamik im Flachwasser

Netzplan-Nr.: A39550270133

Projektleiter: Dr.-Ing. C.-U. Böttner, Wasserbau im Küstenbereich, Ästuarsysteme I (K2)

E-Mail: carl-uwe.boettner@baw.de

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

Die Fragestellung besteht aus der Bestimmung der Strömungsverhältnisse und Transportvorgänge in der Umgebung des Schiffs und in der Wasserstraße. Während in den vergangenen Jahrzehnten eine rege Forschungs- und Entwicklungstätigkeit bei der Schiffsumströmung zu verzeichnen ist, wurde der Aspekt des Flachwassereinflusses und der geringen Kieffreiheit bisher wenig beachtet. Das liegt darin begründet, dass dieser Fahrzustand in der Dienstzeit eines Schiffes nur zu einem geringen Teil vorkommt und daher für die Schiffseigner eine untergeordnete Rolle spielt, aber auch darin, dass die mathematisch numerische Modellierung noch erheblich anspruchsvoller ist, wenn Verblockungseffekte und sich vereinigende Grenzschichten zu berücksichtigen sind. Für die WSV ist hingegen die Revierfahrt unter Flachwassereinfluss der einzig relevante Fahrzustand. In der jüngsten Vergangenheit haben Rechnerleistung und Speicherkapazitäten einen Stand erreicht, der es ermöglicht, Kräfte, Momente und die auftretende Fahrdynamik mathematisch numerisch vorherzusagen und zu beschreiben. Damit werden dringend benötigte Daten und Werte für die Bemessung und die wirtschaftliche Ausnutzung der Seeschiffahrtsstraßen erlangbar, die sich experimentell, aus dem physikalischen Modellversuch oder aus Naturmessungen, nur sehr aufwändig oder gar nicht gewinnen lassen.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die Verfügbarkeit eines Verfahrens zur Vorhersage fahrdynamischer Größen im Flachwasser ist bei vielen Aufgaben der WSV hilfreich. Häufig existieren die Schiffe, zu denen die Fragestellung erarbeitet wird, nicht oder noch nicht, dennoch müssen Aussagen zur Befahrbarkeit gemacht und verbindliche Entscheidungen getroffen werden. Hierfür ist die Verfügbarkeit einer verlässlichen Datenquelle in Form eines mathematisch numerischen Verfahrens ein wichtiges Werkzeug von großer Bedeutung.

1.3 Untersuchungsziel

Das Ziel in diesem Teilprojekt der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff-Seeschiffahrtsstraße ist es, bestehende und verfügbare mathematisch numerische Verfahren zur Berechnung der Schiffshydrodynamik zu validieren, zu erweitern und zu ergänzen um künftig Verfahren bereit zu stellen, die als verlässlich zur Vorhersage von Kennwerten der Schiffsdynamik im Flachwasser anerkannt sind.

2 Untersuchungsmethoden

Verfügbare bestehende Verfahren werden anhand von experimentellen Werten aus Naturmessungen und dem physikalischen Modellversuch überprüft, validiert und gezielt weiterentwickelt. Die hierfür benötigten experimentellen Daten werden zum Teil im Rahmen des hier beantragten Projekts ermittelt, zum Teil aus parallelen Teilprojekten und aus Kooperationen, sowie aus der Literatur und aus Vergabeleistungen zusammen gestellt. Die Weiterentwicklungen der Verfahren werden von Fremdleistungnehmern als Vergabeleistung und durch die Projektmitarbeiter in der DH betrieben.

3 Ergebnisse

Im Jahr 2011 wurden umfangreiche numerische Simulationen der Rumpfumströmung unter Berücksichtigung der dynamischen Schwimmelage mit dem Softwarepaket CCM+ von CD-adapco durchgeführt. Ziel dabei war es, die Gittersensitivität und das Konvergenzverhalten der Software nachzuvollziehen. Nach grundlegenden Untersuchungen zum numerischen Verhalten der Implementierungen zur Berechnung der Phasengrenze mittels Volume of Fluid (VoF) und der Bewegung des Schiffes über das Gleichgewicht äußerer Kräfte und Beschleunigungen zur Bestimmung der Verlagerung im Raum mit maximal 6 Freiheitsgraden (6 DoF, Degrees of Freedom) wurden Versuche zur Abhängigkeit von

der Zeitschrittweite, Gitterweiten und –typen, Rampen zur allmählichen Freigabe einzelner Freiheitsgrade und Parallelisierung (Skalierung) durchgeführt. Stand zum Ende des Jahres 2011 ist, dass stabile Konfigurationen gefunden werden konnten und je nach Fragestellung die sinnvolle Ressourcenbelegung festgestellt ist. So ist es beispielsweise bei Gitterverzerrungen (Morphing) nicht sinnvoll, auf einer größeren Anzahl CPUs verteilt zu rechnen, da dieser Algorithmus ein anderes Skalierungsverhalten aufweist als die Löseralgorithmen der anderen Gleichungssystemmatrizen. Auf dieser Basis können nun kurzfristig konkrete Einzelfalluntersuchungen durchgeführt werden.

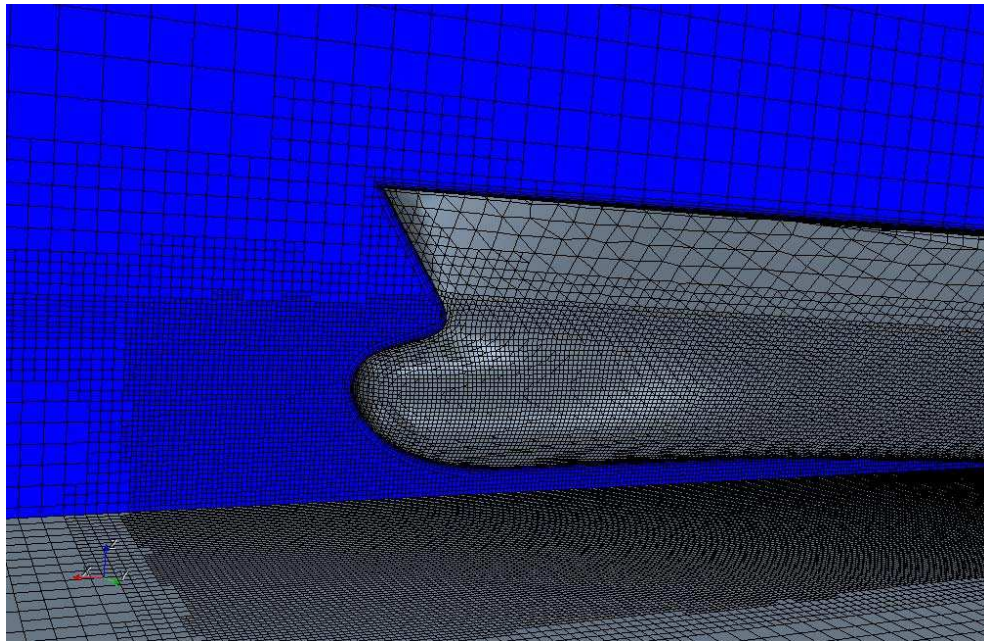


Bild 1: Darstellung eines numerischen Gitters mit lokaler Verfeinerung für die Berechnung der Rumpfumströmung und der dynamischen Schwimmelage bei geringer Kielfreiheit

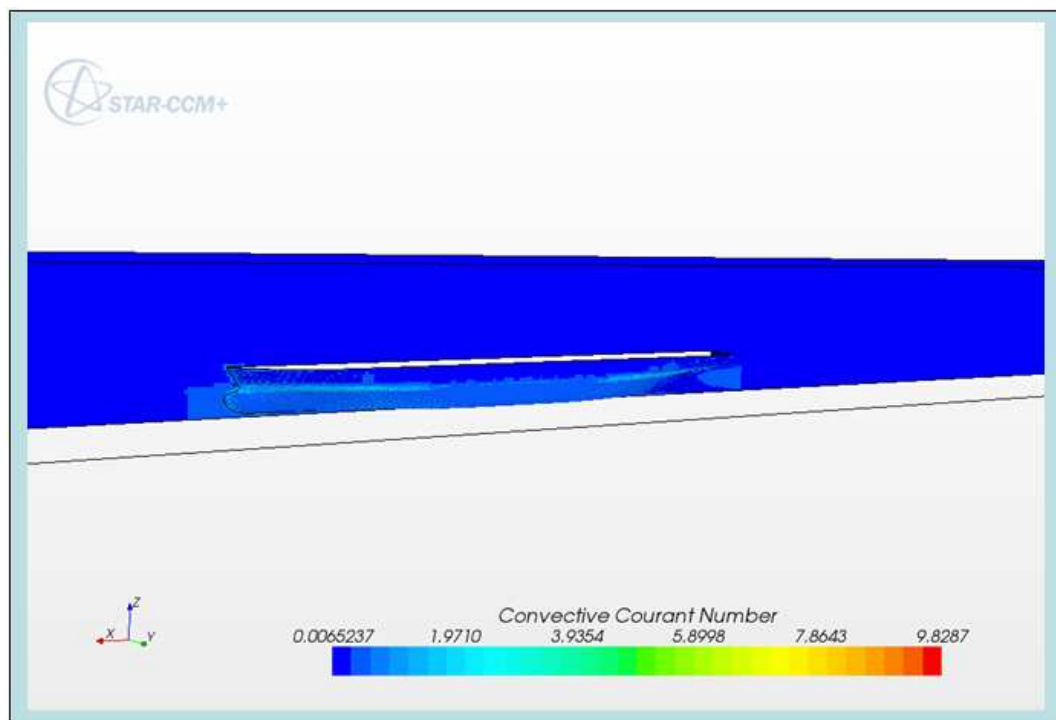


Bild 2: Grafische Darstellung der Courant-Zahl, dem Verhältnis Gitterweite zu iterativer Zeitschrittweite

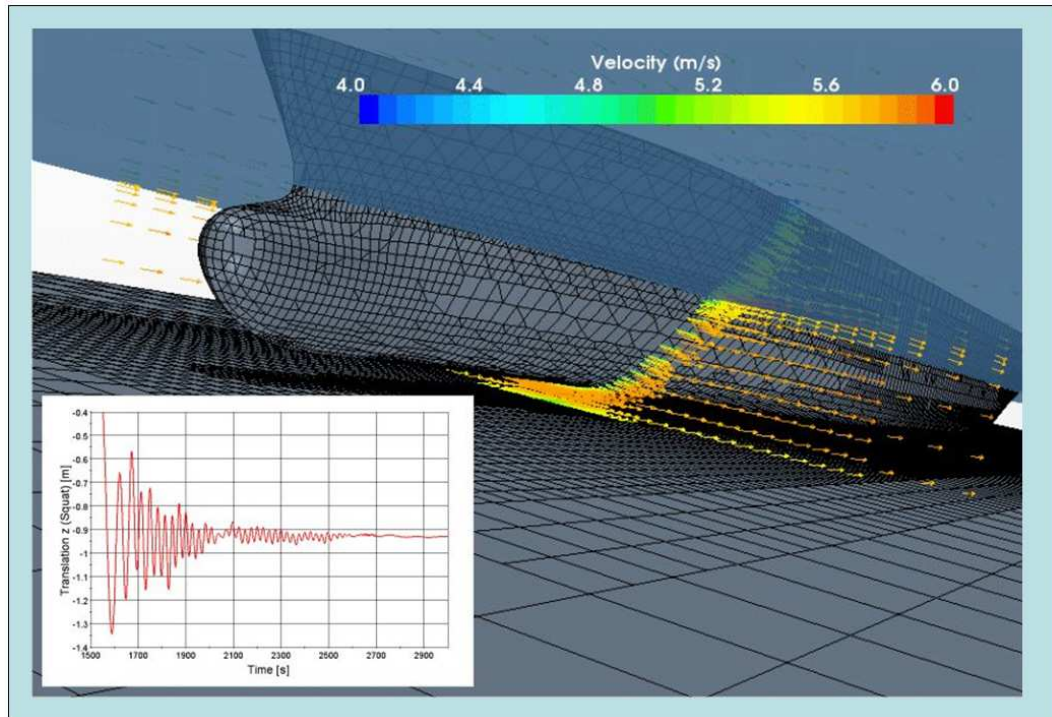
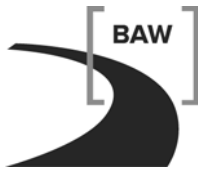


Bild 3: RANSE-Simulation der Rumpfumströmung und Berechnung der dynamischen Schwimm- lage bei geringer Kielfreiheit, das kleine Fenster zeigt den Verlauf des Einschwingens der berechneten dynamischen Schwimm- lage.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Der Schwerpunkt der Forschungstätigkeit liegt im nächsten Jahr weiterhin auf der numerischen Be- rechnung der zweiphasigen Schiffsumströmung und der dynamischen Schwimm- lage im hydrodynamischen Gleichgewicht. Hierfür werden zunächst Testfälle aus dem physikalischen Modellversuch nach- gerechnet, ehe im Anschluss systematische Untersuchungen durchgeführt werden. Hier steht im ers- ten Schritt das Squatverhalten bei kontinuierlicher Verringerung des Endverhältnisses im Vordergrund. Weitere Aufgaben erwachsen aus der Charakterisierung der Bank-Kräfte (Sog und Giermoment). Die- se Arbeiten werden hauptsächlich im Haus durchgeführt, unterstützt durch externe Diplomarbeiten und Vergaben einzelner Fragestellungen. Für die Vergabe kommen beispielsweise die Technische Universität Berlin und der Germanische Lloyd in Frage. Es besteht die berechtigte Hoffnung bis Ende diesen Jahres belastbare Vorhersagen für Squat und Trimm als Eingabedaten für beispielsweise Tide- fahrpläne oder die Schiffsführungssimulation zur Bemessung zur Verfügung stellen zu können.

Freimanövrierende Versuchsfahrten sind frühestens Anfang 2013 vorgesehen. Bis dahin sind die ent- sprechenden Versuchseinrichtungen der Halle 1 durch andere Forschungsaufgaben belegt. Das Vor- haben liegt in der ursprünglichen Zeitplanung des Projektantrags.



KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt
(<http://www.kliwas.de/>)

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

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

Netzplan-Nr.: A39550310162

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

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

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

An den ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen und dem Stand des Wissens der BAW-Projekte 2.04 und 3.02 im Programm KLIWAS, die im Detail im FuE-Bericht 2009 dargestellt worden sind, hat sich in 2011 nichts geändert.

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

An den Untersuchungsmethoden der BAW-Projekte 2.04 und 3.02 im Programm KLIWAS, die im Detail im FuE-Bericht 2009 dargestellt worden sind, hat sich in 2011 nichts geändert.

3 Ergebnisse

Nordsee:

Der Einfluss eines Meeresspiegelanstiegs im Atlantik auf die Gezeiten in der Nordsee ist in einem Experiment mit einem HN-Modell der Nordsee untersucht worden. Hierfür wurden zwei Simulationen durchgeführt, die miteinander verglichen wurden: eine Simulation für den gegenwärtigen Zustand und die Simulation des Experimentes. Für das Experiment ist am „atlantischen“ Rand des Nordseemodells ein Meeresspiegelanstieg von 80 cm auf die eingesteuerten Zeitreihen des Wasserstandes addiert worden. Die Erhöhung des Wasserstandes am Rand der Nordsee um 80 cm führte zu einer Zunahme des Tidehubes im Bereich der Ästuarmündungen (Ems, Jade-Weser, Elbe) von 4 bis 8 cm. In einer Sensitivitätsstudie ist dann geprüft worden, welchen Einfluss Änderungen des mittleren Meeresspiegels auf die Verhältnisse im Inneren der drei deutschen Ästuar haben. Als vorläufiges Ergebnis dieser Studie wird für Untersuchungen des Einflusses eines durch den Klimawandel bedingten Meeresspiegelanstiegs auf Sturmfluten nur der Meeresspiegelanstieg auf die eingesteuerten Zeitreihen des Wasserstandes am seeseitigen Rand der Ästuarmodelle addiert. Für mittlere Verhältnisse werden die vom Nordseemodell berechneten Randwerte verwendet (s. o.).

Ostsee:

Wasserstandsschwankungen in der Ostsee werden im heutigen Klima durch den Wind geprägt. Bei einem durch Klimawandel bedingten Meeresspiegelanstieg werden bei denselben Windverhältnisse geringfügige Änderungen in Amplitude und Phase erwartet. Aufgrund der kurzen Eigenperioden der Förden und Buchten im Verhältnis zu den typischen Eigenperioden der Ostsee werden die Amplituden der Wasserstandsschwankungen nicht durch Resonanz verstärkt. Dieses Verhalten gilt auch bei erhöhtem Meeresspiegel. In der Entwicklung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel wird also bezüglich der Wasserstände die Änderung des Mittelwasserstandes maßgeblich sein. Der mittlere Wasserstand im Kattegat bestimmt maßgeblich den mittleren Wasserstand der Ostsee und deren Füllungsgrad.

Ems, Jade-Weser, Elbe:

Für die drei Ästuar Ems, Jade-Weser und Elbe ist das Systemverhalten unter möglichen durch den Klimawandel veränderten Bedingungen für einen Spring-Nipp-Zyklus untersucht worden. Dabei wurde in einer Sensitivitätsstudie der Einfluss eines möglichen Meeresspiegelanstiegs in der Deutschen Bucht auf die Hydrodynamik und das Transportverhalten von Salz und Sedimenten in der Tideelbe untersucht. Die Untersuchungen ergeben bei einem Meeresspiegelanstieg von 80 cm in der Deutschen Bucht z. B. Zunahmen im Tidehub sowie eine Verformung der Tidekurve entlang der Elbe: Dadurch nehmen in der Elbe die Flutstromgeschwindigkeiten stärker zu als die Ebbestromgeschwindigkeiten, was zu einer Verstärkung des stromauf gerichteten Sedimenttransportes (Tidal Pumping) führt. Der erhöhte Meeresspiegel führt außerdem in allen untersuchten Ästuaren zu einer Verschiebung der Brackwasserzone nach stromauf.

Die Auswirkungen von veränderten Oberwasserzuflüssen sind in den Ästuaren vergleichbar. Die unterschiedliche Charakteristik ist dabei nicht nur von der Geometrie abhängig, sondern auch vom Abfluss selber, da dieser im besonderen Maße vom Einzugsgebiet der Flüsse geprägt wird. Die Lage und Größe der Einzugsgebiete der Flüsse bestimmen die Menge und Qualität des Abflusses, der als Oberwasserzufluss über das Wehr

- bei Geesthacht in die Tideelbe,
- bei Hemelingen in die Tideweser und
- bei Herbrum in die Tideems

fließt. Unter natürlichen Verhältnissen bestimmen der Oberwasserzufluss und die Gezeiten die Lage der Brackwasserzone. Die Brackwasserzone passt sich veränderten Situationen an; z. B. bei einem abnehmenden Oberwasserzufluss verlagert sie sich nach stromauf. Die Verlagerung der Brackwasserzone durch Advektion und turbulente Vermischung erfolgt nicht instantan, sondern unterliegt einer Trägheit. Bei einem gleichbleibenden Oberwasserzufluss sowie einem gleichförmigen Spring-Nipp-Zyklus stellt sich erst nach einer Zeitspanne (abhängig von Historie in Kombination mit der Oberwassermenge) eine quasi stationäre Lage der Brackwasserzone ein. An einem Ort innerhalb der Brackwasserzone ist dann der maximale Salzgehalt abhängig von der jeweiligen Höhe der auflaufenden Tide.

Der Oberwasserzufluss beeinflusst wie der Meeresspiegel nicht nur die Lage der Brackwasserzone, sondern auch die Trübungszone. Dieser Einfluss ist für die drei Ästuar untersucht worden. Die berechneten Ergebnisse zeigen, dass mit zunehmender Oberwassermenge die Trübungszone stromab verschoben wird. Allgemein kann daraus abgeleitet werden, dass hohe Oberwasserzuflüsse zu einer Entlastung der Unterhaltungssituation insbesondere im oberen Teil der Ästuar führen.

In die Tideelbe werden mit großen Oberwasserzuflüssen Schadstoffen (Cadmium, Quecksilber, Zink, Hexachlorbenzol, Verbindungen der DDT-Gruppe), die die Hauptquelle im Oberlauf der Elbe haben, in große Mengen eingetragen. Von oberstrom kommend lagern sich die feststoffgebundenen Schadstoffe in strömungsruhigen Zonen wie z. B. Hafengebiete ab, die bei einer Unterhaltung zu einer Belastung des Baggergutes führen.

In einer Sensitivitätsstudie zu Sturmfluten in Elbe, Jade-Weser und Ems werden systematische Variationen der Parameter durchgeführt, die sich durch den Klimawandel verändern können. Die Sensitivitätsstudie wird auf der Grundlage von historischen sehr hohen Sturmfluten durchgeführt (Sturmflut 3. Januar 1976 in Elbe und Jade-Weser, Sturmflut 1. November 2006 in der Ems). Die Änderungen der Sturmflutscheitelwasserstände sind in Abbildung 1 dargestellt und in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Sturmflutscheitelwasserstand im Mündungsbereich wird durch das Geschehen in der Nordsee,

d. h. die Sturmflut und den Meeresspiegelanstieg bestimmt. Im Ästuar wird der Sturmflutscheitelwasserstand sowohl durch das Geschehen in der Nordsee als auch dem Geschehen im Binnenbereich (Abfluss) geprägt.

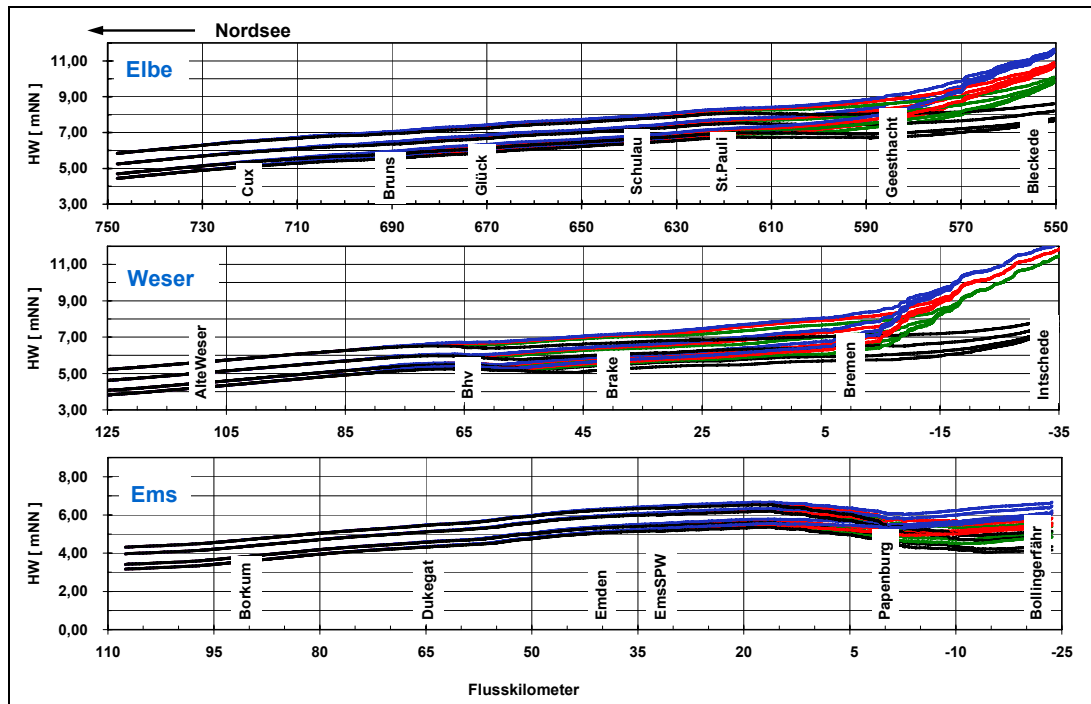


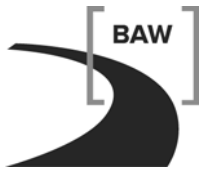
Bild1: Einfluss des Meeresspiegelanstiegs (heutiger Meeresspiegel m_{sl} , $m_{sl} + 25\text{ cm}$, $m_{sl} + 80\text{ cm}$, $m_{sl} + 115\text{ cm}$) und des Oberwasserzuflusses (gemessener Abfluss in Schwarz, $2000\text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $350\text{ m}^3/\text{s}$ (grün), $3000\text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $700\text{ m}^3/\text{s}$ (rot) und $4000\text{ m}^3/\text{s}$ bzw. $1200\text{ m}^3/\text{s}$ (blau)) auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang der Ästuar von Elbe, Weser und Ems.

| Szenarien | Ästuar­mündung | „mittleres“ Ästuar | „oberes“ Ästuar |
|--------------------------|----------------|-------------------------|-------------------------|
| Oberwasserzufluss Q | +/- 1 cm | 5 cm bis 30 cm | 10 cm bis 100 cm |
| Meeresspiegelanstieg slr | + slr | + (slr +/- 10 cm) | + (slr +/- 10 cm) |
| Kombination Q & slr | + slr | $\leq (\text{slr} + Q)$ | $\leq (\text{slr} + Q)$ |

Tabelle 1: Änderung des Sturmflutscheitelwasserstandes für die betrachteten Szenarien entlang der Ästuar von Elbe, Weser und Ems

Die betrachteten Szenarien führen zu einer Zunahme der Sturmflutscheitelwasserstände, einer früheren Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes sowie einer längeren Dauer hoher Wasserstände. Es ist davon auszugehen, dass die bekannten Probleme bei Sturmfluten durch den Klimawandel verstärkt werden.

Am Beispiel des Emssperrwerkes wird gezeigt, wie die Ergebnisse einer Sensitivitätsstudie eingesetzt werden können, um mit der WSV zusammen Betroffenheiten entlang der Bundeswasserstraßen zu identifizieren und geeignete Anpassungsmaßnahmen zu entwickeln.



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.

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 [Casulli, V., 2008]. 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 (vierfache Datenmenge, halber Zeitschritt).

Die Verwendung topografischer Informationen auf der Subgrid-Skala (also unterhalb der „klassischen“ Gitternetzauflösung liegend, auf der das Gleichungssystem gelöst wird) 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 Tidenstieg 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.
- Prinzipbeispiel U-Kanal (stationär) mit Trapezgerinne und seitlichen Vorländern.
- Ortspezifisches Modell der Elbe (instationär) für Ist-Zustand und eine Ausbauvariante (Vertiefung).
- 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 UnTRIM² (sprich UnTRIM-Quadrat; siehe Literatur) sowohl in der BAW als auch bei Smile Consult zur Verfügung [Casulli, V., Stelling, G. S., (2010)].

Die Berechnungsergebnisse werden mit in der BAW verfügbaren Methoden weitergehend analysiert und visualisiert.

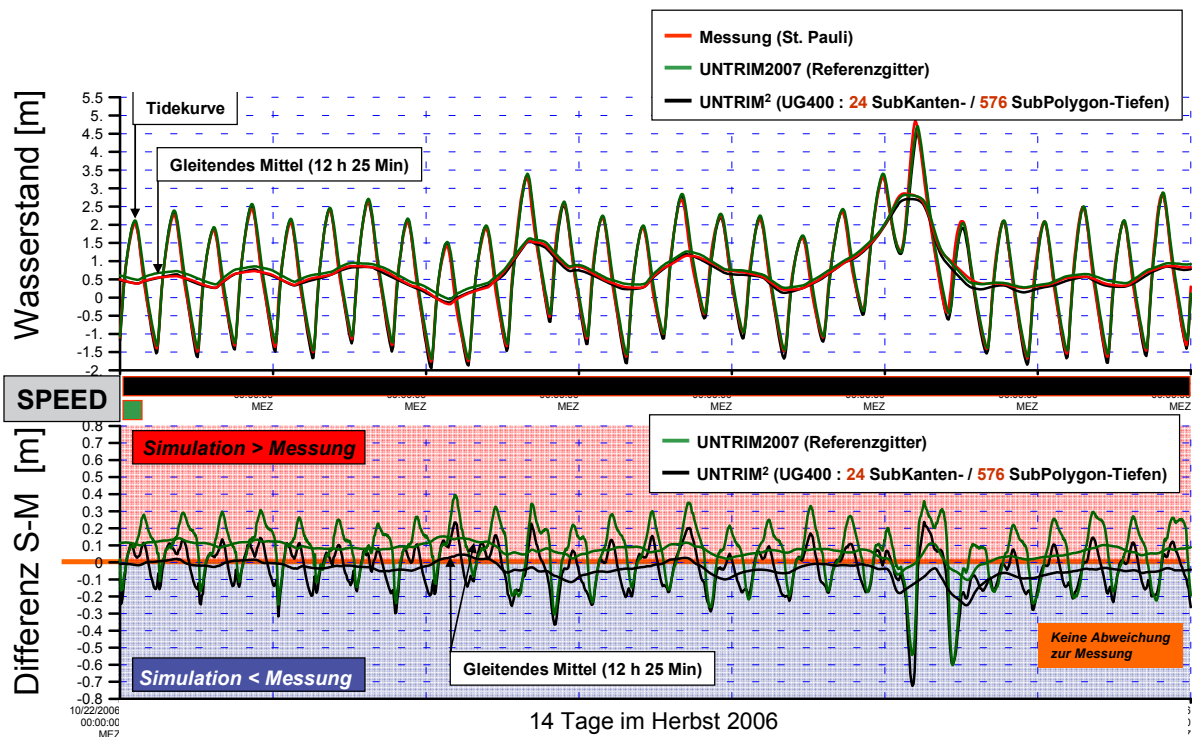


Bild 1: Oben: Wasserstand und gleitendes Mittel (Tidemittel) des Wasserstands am Pegel Hamburg St. Pauli. Messung (Rot), UnTRIM2007 (Grün), UnTRIM² (Schwarz). Unten: Differenz der Tidekurven sowie der tidegemittelten Größen (Simulation minus Messung). UnTRIM2007 (Grün), UnTRIM² (Schwarz). Mitte: relative Fortschrittsgeschwindigkeit der Simulation für UnTRIM2007 (Grün) und UnTRIM² (Schwarz). Nach: Rudolph, Kremp (2011), "OPTEL — Operational forecast model for the Elbe Estuary", Vortrag auf dem UnTRIM User Meeting 2011, Folie 42 (modifiziert).

3 Ergebnisse

- Dokumentation der Programmierschnittstelle (API) für UnTRIM².
- Einbinden von UnTRIM² in die BAW-Programmierungsumgebung ProgHome.
- Umsetzen diverser Strategien zur Generierung von Gitternetzen mit SubGrid in JaNET.
- Erzeugen der Gitternetze für das Prinzipbeispiel U-Kanal, mit 12, 6, 3, 2 und 1 Zellen über den Querschnitt; d. h. von voll aufgelöst (mit 12 Zellen) bis querschnittsintegriert (mit 1 Zelle).
- Durchführen der Sensitivitätsstudien für den U-Kanal.
- Erzeugen der strukturierten Gitternetze für die Elbe (Ist-Zustand). Auflösung des Berechnungsgitters: 400, 200, 100 und 50 m. Auflösung der Topografie im SubGrid: 25 und 10 m.
- Durchführen der Sensitivitätsstudien für die unter Punkt 6 erzeugten Gitternetze.
- Überarbeitung des konzeptionellen Modells zur Berücksichtigung der Bodenreibung in Modellen mit SubGrid in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Casulli, Universität Trient.
- Erzeugen der unstrukturierten, an die Strömung angepassten Gitternetze für die Elbe (Ist-Zustand). Mittlere Auflösung des Berechnungsgitters: 400, 200, 100 und 50 m. Auflösung der To-

- pografie im SubGrid: 24, 12, 6 und 3 Tiefenklassen für jede Kante, bzw. 576, 144, 26 und 9 Tiefenklassen für jedes Polygon; siehe auch Bild 1.
- Sensitivitätsstudien für die unter Punkt 9 erzeugten Gitternetze. Vergleich der auf unterschiedlichen Gitternetzen erzielten Ergebnisse für die Tidedynamik; siehe auch Bild 2.
 - Erzeugen der Gitternetze (Ausbau-Variante) mit vertiefter Fahrrinne in dem Abschnitt Elbe km 624 – 748 analog zu Punkt 9.
 - Sensitivitätsstudien für die unter Punkt 11 erzeugten Gitternetze. Vergleich der auf unterschiedlichen Gitternetzen erzielten Ergebnisse für die prognostizierten ausbaubedingten Änderungen.
 - Schulung interessierter BAW-Mitarbeiter zum Thema *Erzeugen von Gitternetzen mit SubGrid mit Hilfe von JaNET* am 30. 11. und 1. 12. 2010; in Kooperation mit Smile Consult, Hannover.
 - http://www.baw.de/methoden/index.php5/Mathematisches_Verfahren_UNTRIM2 : Dokumentation der SubGrid-Technologie im BAWiki.
 - Durchführen von Langzeitsimulationen (ein Jahr) für das Elbe Ästuar. Vergleich der mit UnTRIM2007 und UnTRIM² erzielten Ergebnisse. Diese Simulationen wurden in Zusammenarbeit mit dem Projekt KLIWAS (A 395 5 03 10162) durchgeführt. Siehe auch Bild 1.
 - Erzeugen der unstrukturierten, an die Strömung angepassten Gitternetze für die Ems (Ist-Zustand). Mittlere Auflösung des Berechnungsgitters: 400, 200, 100 und 50 m. Auflösung der Topografie im SubGrid: 24, 12, 6 und 3 Tiefenklassen für jede Kante, bzw. 576, 144, 26 und 9 Tiefenklassen für jedes Polygon. Ferner wurde in dem größten Gitter mit SubGrid die Fahrrinne und die daran unmittelbar angrenzenden Bereiche, in Querrichtung, in mehreren Stufen (Faktor 2, 3 und 4) verfeinert; in dem restlichen Modellgebiet wurde die relativ grobe Auflösung beibehalten.
 - Sensitivitätsstudien für die unter Punkt 16 erzeugten Gitternetze. Vergleich der auf unterschiedlichen Gitternetzen erzielten Ergebnisse für die Tidedynamik.
 - Durchführen der „UnTRIM SubGrid Days“ vom 23. – 24. August 2011 in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Casulli (Universität Trient) bei der BAW Dienststelle Hamburg. Teilnehmerkreis BAW, BfG, BSH, GKSS und UniBw, München.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Themen

- Konzept zur vollständigen Integration der SubGrid-Technologie im Postprocessing der BAW, sowie die
- Anforderungsanalyse für die Kopplung mit Seegang und Morphodynamik

sollen - wie geplant - in separaten Nachfolge-Projekten bearbeitet werden.

5 Literatur

- Casulli, V. , Stelling, G. S. (2010) : Semi-implicit sub grid modelling of three-dimensional free-surface flows. International Journal for Numerical Methods in Fluids, derzeit nur Online verfügbar.
- Casulli, V. (2008) : A high resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. International Journal for Numerical Methods in Fluids, Band 60, Heft 4, 391 - 408.
- Rudolph, Kremp (2011), „OPTTEL — Operational forecast model for the Elbe Estuary“, Vortrag auf dem UnTRIM User Meeting 2011, Folie 42 (modifiziert).

6 Veröffentlichungen

- Rudolph, Kremp (2011), „OPTTEL — Operational forecast model for the Elbe Estuary“, Vortrag auf dem UnTRIM User Meeting 2011.

KLIMZUG-Nord – Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg (KLIMZUG-NORD: News)

Netzplan-Nr.: A39550370163

Projektleiter/in: Dr. N. Winkel, Dr. E. Rudolph, Dienststelle Hamburg, Referat Ästuarsysteme II (K3)

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

1 Problemstellung und Ziel

Die Tideelbe gehört zu den wichtigsten europäischen Schifffahrtsstraßen. Der Klimawandel wird die nautischen Verhältnisse, den Zustand der Wasserstraße und die ästuartypischen Lebensräume verändern. Die möglichen Betroffenheiten werden hauptsächlich durch einen Anstieg des Meeresspiegels, veränderte Sturmaktivitäten und ein verändertes Abflussregime beeinflusst. Die BAW untersucht im Rahmen dieses 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. Das Projekt liefert Beiträge für ein „Kursbuch“, mit dem in der Metropolregion Hamburg die Herausforderungen des Klimawandels bearbeitet werden können.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

An den ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen und dem Stand des Wissens in den BAW-Teilprojekten des Programms KLIMZUG-Nord, die im Detail im FuE-Kompodiumsbericht 2009 dargestellt worden sind, hat sich in 2011 nichts geändert.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

An den Untersuchungszielen hat sich gegenüber der Darstellung im FuE-Kompodiumsbericht 2009 nichts verändert.

2 Untersuchungsmethoden

An den Untersuchungsmethoden in den BAW-Teilprojekten des Programms KLIMZUG-Nord, die im Detail im FuE-Kompodiumsbericht 2009 dargestellt worden sind, hat sich in 2011 nichts geändert.

3 Ergebnisse

In einer Pilotstudie wird untersucht, wie sich die Hydrodynamik und das Transportverhalten von Salz und Sedimenten in der Tideelbe bei einem möglichen Meeresspiegelanstieg (im Weiteren: MSLanstieg) in der Nordsee ändern könnte. Zur Charakterisierung der heutigen typischen Verhältnisse wird zunächst ein Vergleichszustand aus dem Jahr 2006 simuliert. Zur Simulation des MSLanstiegs wird das BAW-Nordseemodell verwendet, das die Wasserstände für den seeseitigen Rand des Elbe-Modells liefert. Hierfür wird der Betrag von 80 cm auf die Mittelwasserlage am seeseitigen Rand des Nordseemodells addiert. Dieser Wert ist der aktuellen Literatur für das Emissionsszenario A1B und die Deutsche Bucht entnommen z.B. [Gönnert, G., et al., 2009]. Mithilfe des Elbe-Modells werden dann für

beide Zustände Wasserstand, Strömungsgeschwindigkeit, Salzgehalt und Schwebstoffgehalte sowie deren Tidekennwerte berechnet und analysiert. Die Untersuchungen ergeben bei einem MSLAnstieg von 80 cm in der Deutschen Bucht Zunahmen im Tidehub sowie eine Verformung der Tidekurve entlang der Elbe. Dadurch nehmen die Flutstromgeschwindigkeiten stärker zu als die Ebbestromgeschwindigkeiten, was zu einer Verstärkung des stromauf gerichteten Sedimenttransportes (Tidal Pumping) führt. Der erhöhte Meeresspiegel führt außerdem zu einer Verschiebung der Brackwasserzone nach stromauf. Durch die veränderten hydrodynamischen Bedingungen können zahlreiche Betroffenheiten entlang der Tideelbe entstehen. Diese sollen im Projekt ermittelt und Anpassungsoptionen entwickelt werden.

Im Weiteren werden Studien zu möglichen Veränderungen der Sturmfluteigenschaften durch den Klimawandel in der Tideelbe durchgeführt. Als Grundlage dienen zwei historische sehr hohe Sturmfluten (3. Januar 1976, 28. Januar 1994). In mehr als 50 Sensitivitätsstudien werden für diese Ereignisse die wichtigsten Einflussgrößen auf die Wasserstände nach aktuellem Stand der Klimaforschung variiert: a) MSLAnstieg um +25 cm, +40 cm, +80 cm, +115 cm, +140 cm, +200 cm durch Anhebung des Tidemittelwassers am seeseitigen Elbe-Modellrand; b) Variation des Oberwasserzuflusses (Q) um 2000 m³/s, 3000 m³/s, 4000 m³/s; c) Erhöhung der Windgeschwindigkeit um +5 %, +10 %) und Kombinationen aus a), b) und c). Als charakteristische Kennwerte werden die Sturmflutscheitelwasserstände, Eintrittszeiten der Scheitelwasserstände sowie Dauer hoher Wasserstände ermittelt. Beispielhaft ist in Bild 1 der Einfluss des MSLAnstiegs auf die Scheitelwasserstände mit einer MSL-Variation (+80 cm) und 3 verschiedenen Oberwasserzuflüssen für das Sturmflutereignis 1994 abgebildet.

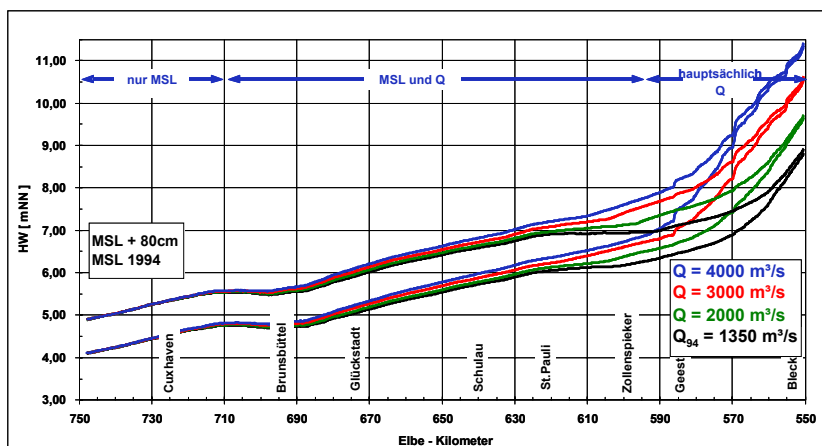


Bild 1: Scheitelwasserstände entlang des Elbästuars mit Variation eines Meeresspiegelanstiegs (MSL) in Kombination mit dem Oberwasserzufluss (Q).

Es ergeben sich entlang der Tideelbe drei Abschnitte, in denen die Einflussgrößen Meeresspiegel und Q unterschiedlich starkes Gewicht haben: Oberstrom von Hamburg werden die Scheitelwasserstände wird der Meeresspiegelanstieg stark vom Q überprägt. Im unterstromigen Bereich von der Mündung bis Brunsbüttel sind die Scheitelwasserstände hauptsächlich von der Lage des mittleren Meeresspiegels beeinflusst. Im Gegensatz dazu werden die Scheitelwasserstände im Bereich zwischen Brunsbüttel bis St. Pauli sowohl vom Meeresspiegel als auch vom Q bestimmt. Diese 3 Abschnitte lassen sich für alle untersuchten MSL- und Q-Varianten identifizieren. Bild 1 illustriert zusätzlich, dass der Betrag des MSLAnstiegs fast vollständig in den Scheitelwasserständen bis nach Hamburg nachzuweisen ist. Ein steigender MSLAnstieg führt außerdem zu einer Verkürzung der Scheitelwasser-Eintrittszeiten. Zusätzlich führen Zunahmen der Windgeschwindigkeiten um 5 % bzw. 10 % zu einer Erhöhung der Scheitelwasserstände um einige Zentimeter entlang der Tideelbe. Es ist hervorzuheben, dass alle vorgestellten Ergebnisse bislang noch nicht verallgemeinert werden können! Sie gelten im Moment nur im Bezug auf die beiden historischen Sturmfluten (1976 und 1994). Die o.g. Ergebnisse sollen in den Teilprojekten in KLIMZUG-Nord genutzt werden, um alternative Hochwasserschutzkonzepte zu entwickeln.

In Kooperation mit der Hochschule für Angewandte Wissenschaften (HAW) werden weitere Untersuchungen zum Transportverhalten von sedimentgebundenen Schadstoffen (Schwermetalle, Dioxine) in der Tideelbe durchgeführt (siehe FuE-Kompodiumsbericht 2010).

In Zusammenarbeit mit der Uni Hamburg, Abt. Ichthyologie wird das Modellverfahren der BAW für ökologische Fragestellung verwendet. Zum einen wird der Transport von Finten-Larven in der Tideelbe simuliert. Hierzu werden die Fischlarven als passive Tracer im Modellgebiet bei Brunsbüttel und Cuxhaven eingesteuert und für eine Simulationszeitspanne von drei Wochen die Ausbreitung entlang des Ästuars für zwei unterschiedliche Oberwasserzuflüsse ($720 \text{ m}^3/\text{s}$, $300 \text{ m}^3/\text{s}$) untersucht. Die Ergebnisse werden dem Projektpartner Uni Hamburg Aufschluss über den Transportmechanismus der Larven in der Tideelbe geben. Es ist eine gemeinsame Veröffentlichung mit der Uni Hamburg geplant.

Außerdem wird mit dem HN-Modell die Ausbreitung von Finten-Eiern simuliert. Die Eier werden als passive Tracer an bekannten Laichplätzen (Hanskalbsand, Twielenfleth, Glückstädter Nebelbe) ins Modell eingesteuert. Zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Larvenstadien werden den Tracern auch unterschiedliche Sinkgeschwindigkeiten und Durchmesser zugewiesen. Die Simulationszeitspanne beträgt 1 Woche im Mai 2010.

Im Weiteren wurden für die Teilprojekte 1.1 (Ichthyologie), 1.2 (Grundwasser) und 1.3 (Küstenschutzbauwerke) Datensätze für ihre Wirkmodelle erstellt und übergeben.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2010: Definition und Modellierung des Vergleichszustandes

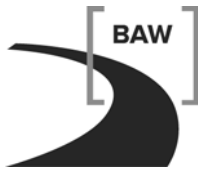
2010/11/12: Definition und Modellierung der Szenarien unter Klimaänderungsbedingungen

2012/13: Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und Modellierung der Wirksamkeit der Anpassungsmaßnahmen

Bearbeitungszeitraum: bis März 2013

5 Literatur

Gönnert, G. , Jensen, J., von Storch, H., Thumm, S., Wahl, T. und Weisse, R. (2009) Der Meeresspiegelanstieg: Ursachen, Tendenzen und Risikobewertung. Die Küste 76 S. 225 – 256.



XtremRisk: Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten – Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel

Netzplan-Nr.: A39550370165

Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. Hocine Oumeraci, Leichtweiß - Institut für Wasserbau (LWI), Technische Universität Braunschweig

Projektmitarbeiter/in BAW: Dr. rer. nat. E. Rudolph, Dr. rer. nat. N. Winkel, Dienststelle Hamburg, Referat Ästuarsysteme II (K3)

E-Mail: elisabeth.rudolph@baw.de, norbert.winkel@baw.de
Internet: <http://www.xtremrisk.de/>

1 Problemstellung und Ziel

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, sollen die Folgen extremer Sturmfluten hinsichtlich Häufigkeit, Intensität und Verweildauer für den Hochwasser- und Küstenschutz abgeschätzt werden, 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 heutigen Bedingungen und für Klimaänderungsszenarien 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 aus Teilprojekt 1 (Risikoquelle) werden entsprechend als Eingaben für die Teilprojekte 2 bis 4 (Risikowege, Risikoempfänger sowie Risikoanalyse, Risikobewertung und Empfehlungen für Risikobeherrschung) aufbereitet.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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 mit empirischen Methoden eine extrem hohe Sturmflut synthetisch zusammengesetzt und ein Wasserstandsverlauf für den Elbmündungsbe- reich bei Cuxhaven (HH_XR2010A) entwickelt. Außerdem werden zwei Sturmflutszenarien aus dem

KFKI Projekt MUSE [Jensen, J. (2005)] (MUSE Sturmflut 1976EPS45 und 1990EPS20), die von BSH und DWD in der Nordsee modelliert wurden, auch für die Elbe betrachtet. Hierfür werden vom BSH Wasserstandsverläufe am seeseitigen Rand der Elbe zur Nordsee und vom DWD lokale Windfelder über der Elbe [Ganske, A. und Rosenhagen, G. (2010)] bereitgestellt.

Die drei untersuchten extremen Sturmflutszenarien erreichen in Cuxhaven mit NN + 6,10 m (HH_XR2010A), NN + 5,24 m (HH_XR2010B) und NN + 6,62 m (HH_XR2010C) Wasserstände höher als das heutige HHThw (NN + 5,10 m am 3.1.1976). Sturmflutszenario HH_XR2010B wird zusätzlich durch drei aufeinanderfolgende sehr hohe Hochwasser (Kettentide) gekennzeichnet.

Für diese synthetischen Sturmflutszenarien wird von der BAW auf der Grundlage der numerischen Modellierung der Wasserstandsverlauf entlang der Elbe bestimmt. Diese Sturmflutwasserstände sind die Eingangsgrößen für weitere Untersuchungen der beteiligten Projektpartner.

2 Untersuchungsmethoden

Durch die Vorgabe von Wasserstandsverläufen in der Elbmündung, der dazugehörigen Windentwicklung über der Elbe sowie der Vorgabe des Abflusses in die Elbe können im Anschluss bei der BAW diese synthetischen Sturmflutszenarien in der Elbe modelliert werden. Hierzu wird das hydrodynamische numerische Modell UnTRIM2004 [Casulli, V. und Walters, R. A. (2000)] bzw. [BAW (2004)] eingesetzt. Im Anschluss kann sowohl der zeitliche Verlauf des Wasserstandes an Orten von Interesse als auch die Analyseergebnisse Sturmflutscheitelwasserstand HW, Eintrittszeit des Sturmflutscheitelwasserstandes tHW, Dauer hoher Wasserstände DHW (LZKWF – BAW-Methoden-Wiki [BAW (2002)]) sowie Durchflusszeitreihen an ausgewählten Querschnitten an die Projektpartner weitergegeben werden. Zur Einordnung der Ergebnisse werden ergänzend Sensitivitätsuntersuchungen durchgeführt. Hierfür wird z.B. der Einfluss der Salzgehaltsverteilung im Ästuar oder die Wirkung des lokalen Windes über der Elbe auf die Sturmflutscheitelwasserstände betrachtet. Mit den Wasserstands- und Durchflusszeitreihen 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 Sturmflutszenario HH_XR2010A wird vom LSBG der Wasserstandsverlauf bei Cuxhaven (Bild 1, links rot dick) vorgegeben. Für die Sturmflutszenarien HH_XR2010B (Bild 1, Mitte grün dick) und HH_XR2010C (Bild 1, rechts blau dick) stehen Wasserstandsrandwerte aus dem Nordseemodell des BSH aus MUSE [Jensen, J. (2005)] zur Verfügung. Die Sturmflutszenarien HH_XR2100A80 (Bild 1, links rot dünn) und HH_XR2100C80 (Bild 1, rechts blau dünn) berücksichtigen einen Meeresspiegelanstieg von + 80 cm in der Nordsee. Der Oberwasserzufluss in das Elbeästuar wird mit $Q = 3600 \text{ m}^3/\text{s}$ (zum Vergleich HHQ = $3620 \text{ m}^3/\text{s}$; [DGJ, 2008]) vorgegeben.

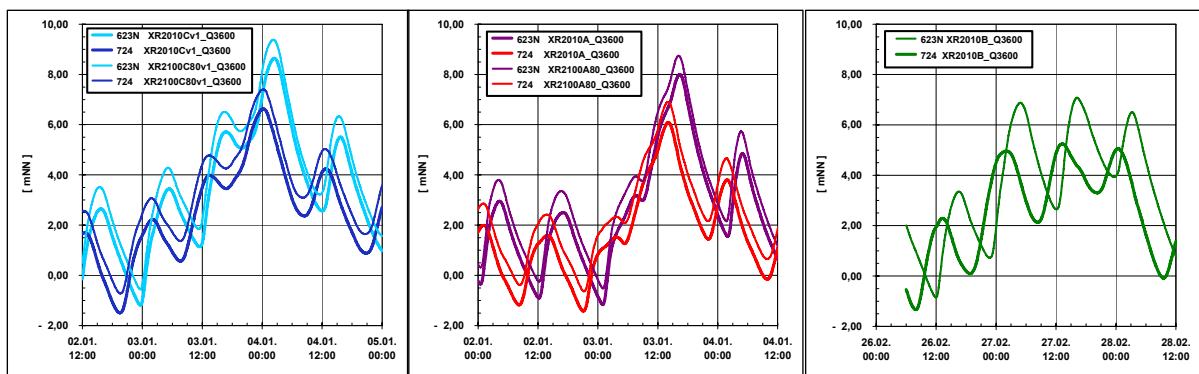


Bild 1: Wasserstandsentwicklung bei Cuxhaven und Hamburg St. Pauli für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A, HH_XR2100A80 (rot, links), HH_XR2010B (grün, Mitte) sowie HH_XR2010C und HH_XR2100C80 (blau, rechts).

Als Ergebnis der numerischen Modellierung erhält man u. a. den Wasserstandsverlauf in Hamburg St. Pauli (Bild 1). Aus der Analyse der Wasserstandszeitreihen [BAW (2002)] erhält man den Sturmflutscheitelwasserstand als höchsten im Auswertzeitraum aufgetretenen Wasserstand. Bild 2 zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe für die fünf untersuchten Sturmflutszenarien. Der Meeresspiegelanstieg von + 80 cm erhöht zwischen Cuxhaven und Hamburg den Sturmflutscheitelwasserstand um + 75 cm bis + 80 cm. Stromauf von Hamburg nimmt die Bedeutung des Meeresspiegelanstieges im Vergleich zum Oberwasserabflusses (hier $Q = 3600 \text{ m}^3/\text{s}$) ab. Im Bereich Hamburg bis Geesthacht bewirkt der Meeresspiegelanstieg lediglich eine Erhöhung des Sturmflutscheitelwasserstandes um ca. 70 cm.

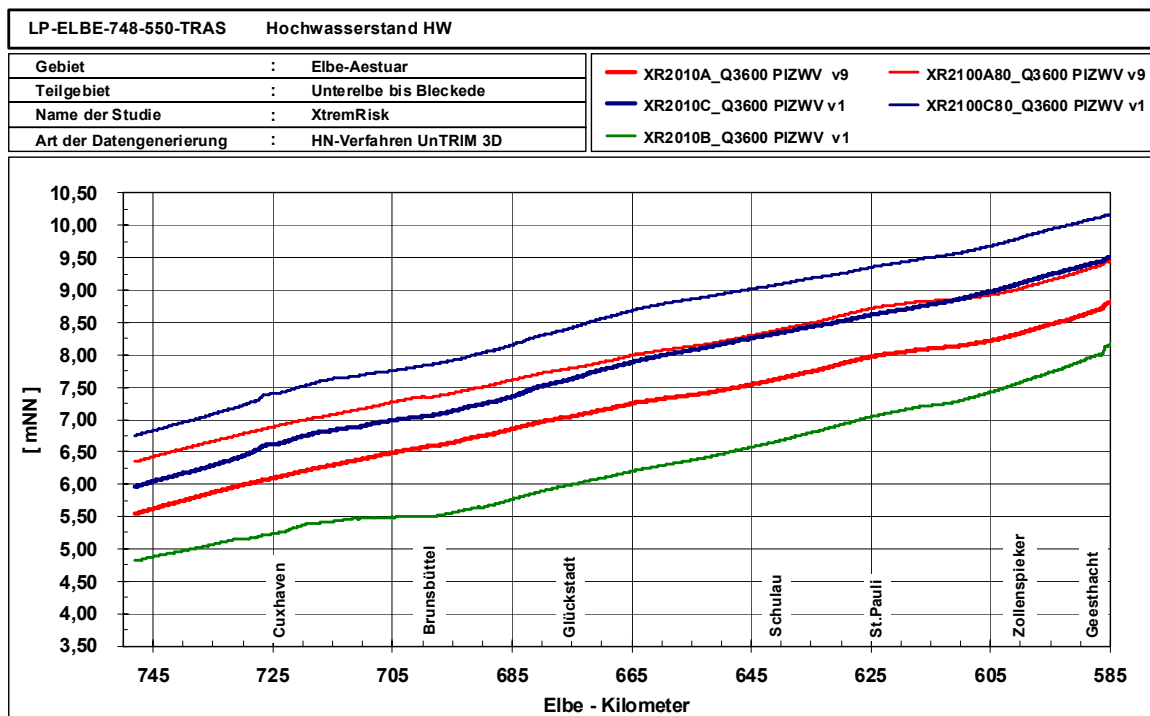


Bild 2: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe zwischen der Elbmündung bei Cuxhaven und dem Wehr Geesthacht für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (rot, fett), HH_XR2100A80 (rot, dünn), HH_XR2010B (grün), HH_XR2010C (blau, fett), HH_XR2100C80 (blau, dünn).

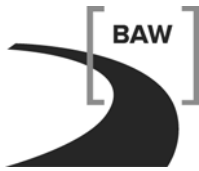
4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Im Rahmen von XtremRisk hat die BAW insgesamt fünf extreme Sturmflutszenarien modelliert und die Modellergebnisse analysiert. Die Analyseergebnisse wurden den Projektpartnern übergeben. Damit ist sichergestellt, dass die Projektpartner die Ergebnisse der numerischen Modellierung der extremen Sturmflutszenarien in den jeweiligen Teilprojekten berücksichtigen können.

Bearbeitungszeitraum XtremRisk: 1. April 2009 bis 1. April 2012.

5 Literatur

- 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
 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



- 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.
- DGJ (2008). Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch – Elbegebiet, Teil III, Untere Elbe ab der Havelmündung, Abflussjahr 2004. Freie und Hansestadt Hamburg – Hamburg Port Authority AöR.
- Ganske, A. und Rosenhagen, G. (2010) OPTEL-B Downscaling von Windfeldern aus Lokalmodellen auf die Tideelbe. Abschlussbericht. BMBF 03KIS070/ KFKI 101. 33 Seiten.
- Jensen, J. (2005). MUSE Modellgestützte Untersuchungen zu Sturmfluten mit sehr geringen Eintrittswahrscheinlichkeiten an der Deutschen Nordseeküste. Abschlussbericht. BMBF 03KIS039/ KFKI 078. 304 Seiten.

Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph

Netzplan-Nr.: A39550370178

Projektleiter: Dr.-Ing. H. Weilbeer, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat K3

E-Mail: holger.weilbeer@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Fragen nach Veränderungen der Hydrodynamik, des Sedimenttransportregimes und damit auch nach einer zukünftigen morphodynamischen Entwicklung des Gewässers gehören auch im Küstenraum zu den primären Fragen, die im Zusammenhang mit veränderten Bedingungen, wie z.B. infolge von Baumaßnahmen oder infolge des Klimawandels, gestellt werden. Eine detaillierte und umfassende Kenntnis der Hydrodynamik und der Transportprozesse des Gewässers ist die wichtigste Grundlage für das Verständnis des Systems und somit eine unverzichtbare Voraussetzung für prognostische Aussagen.

Der Sedimenttransport unterliegt in einem natürlichen System aufgrund der Heterogenität der Sedimente und deren Transporteigenschaften einer starken räumlichen und zeitlichen Variabilität. Eine exakte Berechnung des natürlichen Sedimenttransportes und damit auch der Prognose einer morphodynamischen Entwicklung ist unmöglich. Modellansätze sind stets parameterbehaftet und analytische Lösungen gibt es nur für wenige idealisierte Systeme. Diese Aussagen gelten sowohl für dreidimensionale, kurzfristige und prozessorientierte Modelle als auch in zunehmendem Maße für vereinfachte Modelle, bei denen zugunsten des Prognosezeitraumes die räumliche und zeitliche Auflösung, die Intensität der Kopplung und die Komplexität der Modellierung reduziert werden.

Dennoch ist der Einsatz solcher Modelltypen für morphodynamische Fragestellungen sinnvoll. Die Weiterentwicklungen der Modelltechnik und der Computerressourcen im letzten Jahrzehnt haben es ermöglicht, einen großen Abschnitt auf dem Weg von qualitativen hin zu quantitativen Aussagen zurückzulegen. Bei guter Datengrundlage und fachkundiger Modellierung können durchaus plausible Ergebnisse erzielt werden, die ein wichtiges Hilfsmittel bei der Beantwortung der oben genannten Fragestellung darstellen. Die Vertrauenswürdigkeit der Modellergebnisse muss aber weiter verbessert werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die zukünftige morphodynamische Entwicklung von Bundeswasserstrassen an sich und als Folge von Bau- oder Unterhaltungsstrategien oder als Folge des Klimawandels ist eine zentrale Frage des Verkehrswasserbaus. Die morphologische Entwicklung der Gewässersohle kann die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gefährden, verursacht Baggerkosten und steht auch im Zentrum umweltrelevanter Fragestellungen, da z.B. Schadstoffe an Feinsedimente gebunden sind.

1.3 Untersuchungsziel

Mit Hilfe des FuE-Vorhabens soll die Zuverlässigkeit der morphodynamischen Modellprognosen gesteigert werden.

2 Untersuchungsmethoden

Numerische Modellierung

3 Ergebnisse

Neben dem Aufbau verschiedener akademischer und realer Testfälle erfolgte auch eine Weiterentwicklung des Programmpaketes SediMorph. Dieses wurde so erweitert, dass eine vertikale Schichtung von Sedimenten im oberen Bereich des Bodenmodells abgebildet werden kann (Stratigraphie)

[Fricke, B., 2010]. Dies stellt insbesondere im Zusammenhang mit Baggeroperationen eine notwendige modelltechnische Verbesserung zur realitätsnahen Simulation des Sedimenttransportes dar. Sowohl im Hinblick auf kurzfristige Erosionsereignisse innerhalb eines Tidezyklus als auch bei mittel- und langfristiger morphodynamischer Modellierung wird eine Verbesserung der Modellvalidität erwartet. Diese Erwartungshaltung ist dadurch begründet, dass bei Verwendung des neuen Speichermodells zunächst die Sedimente erodiert werden, die zeitlich zuletzt in dem betreffenden Bereich deponiert wurden.

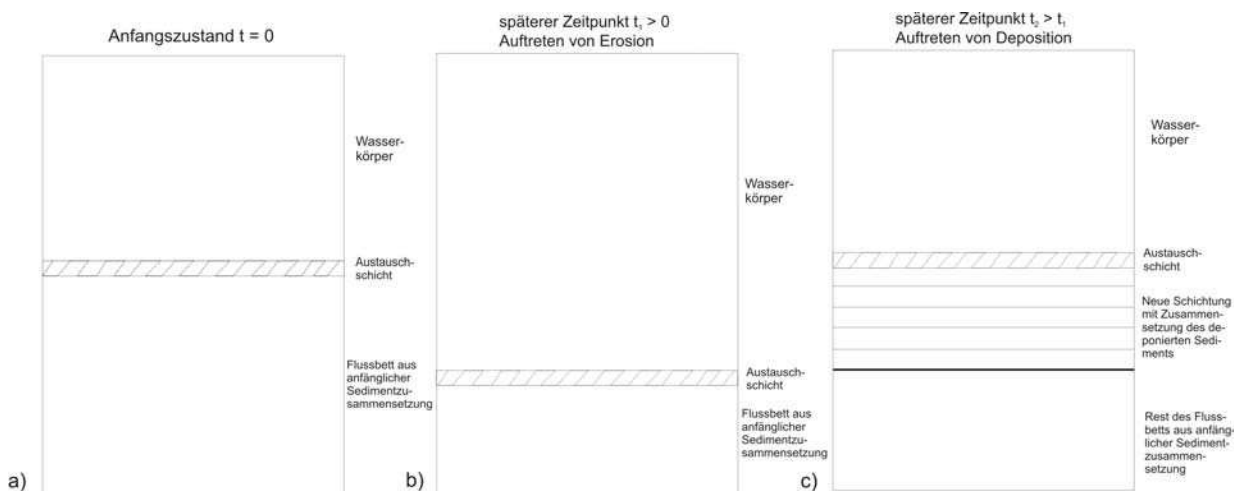


Bild 1: Zum Konzept der dreidimensionalen Speicherschichten in SediMorph

Erste Erfahrungen in der Simulation von Unterhaltungsbaggerungen im Ems-Dollart-Ästuar unter Berücksichtigung des neuen Speichermodells bestätigen die Erwartungen, die mit der Entwicklung dieses Modells verbunden waren.

Die Berücksichtigung von Unterhaltungsbaggerungen in morphodynamischen Simulationen erwies sich als bedeutend, da die natürliche Morphodynamik von der anthropogenen lokal dominiert und auch großräumig beeinflusst werden kann. In Bild 2 ist dies für das Elbmündungsgebiet dargestellt: Die Baggerstelle am Osteriff (jeweils rechts im Bild) ist allein anhand der Differenztopographie zweier Geländemodelle nicht zu erkennen, die stark beaufschlagte Verbringstelle bei Elbe-Km 738 (jeweils links im Bild) hingegen schon. Die morphodynamische Entwicklung süd-östlich der Verbringstelle ist durch die Verdriftung der umgelagerten Sedimente geprägt. Das detaillierte Wissen um die umgelagerten Sedimentmengen ist daher von grundlegender und unverzichtbarer Bedeutung für die Analyse und Prognose natürlicher morphodynamischer Entwicklungen.

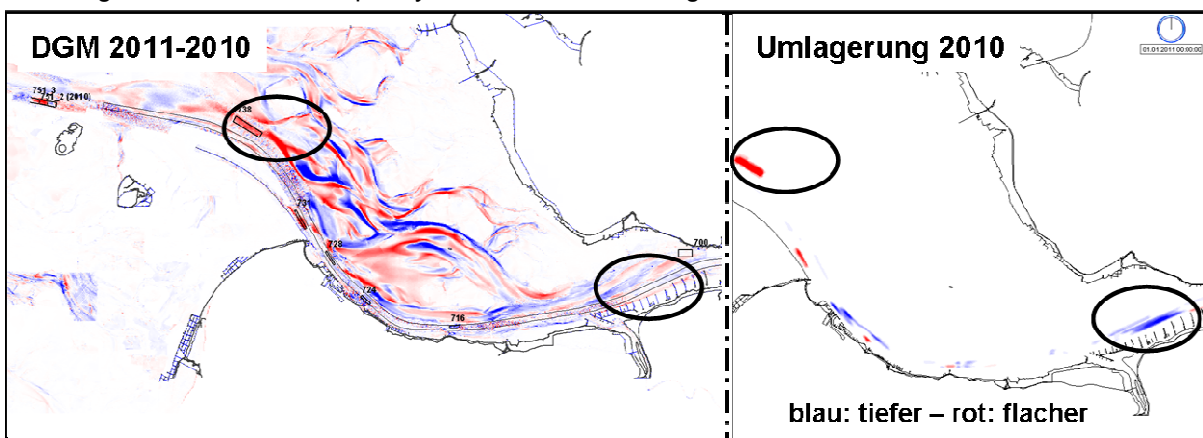


Bild 2: Morphodynamik im Elbmündungsgebiet: Links im Bild sind die Veränderungen der Sohlentiefe anhand der Differenz der digitalen Geländemodelle für 2011 und 2010 dargestellt. Rechts im Bild ist der Anteil an der Veränderung der Sohlentiefe dargestellt, der sich allein aus dem Baggern und Umlagern von Sedimenten aufgrund von Unterhaltungsmaßnahmen ergibt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Es wird ein Ensemble an morphodynamischen Testfällen aus dem Labor und der Natur aufgebaut. Diese Testfälle sind unterschiedlicher Komplexität, so dass die Stärken und Schwächen des Modellverfahrens erkennbar werden. In einem iterativen Prozess zwischen Verbesserung des Modellverfahrens und Durchlaufen der Testfälle werden die Validität und die Prognosefähigkeit verbessert.

1. Modellaufbau für ausgewählte Laborversuche
2. Simulation und Analyse der Laborversuche
3. Modellaufbau für ausgewählte Testfälle aus den Ästuaren
4. Simulation und Analyse der Testfälle aus den Ästuaren
5. Entwicklung und Integration neuer Ansätze
6. Morphodynamische Validierung der Ästuarmodelle

Zeitplan:

2011: Unterpunkte 3, 4, 5 und 6

2012: Unterpunkte 4, 5 und 6

5 Literatur

Fricke, B.: Dokumentation zum dreidimensionalen Speicherschichtmodell von SediMorph.
Unveröffentlichter Bericht, 2010.

Interaktion von Sedimenttransport und Wasserqualität in dreidimensionalen Ästuarmodellen**Netzplan-Nr.:** A39550370190**Projektleiter:** Dr.-Ing. H. Weilbeer, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat K3**E-Mail:** holger.weilbeer@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Sedimenttransportprozesse im Wasserkörper stehen in Wechselwirkung mit chemischen und biologischen Prozessen, deren Wirkzusammenhänge in Wasserqualitätsmodellen simuliert werden. Dazu gehören z.B. der Sauerstoff- und Nährstoffhaushalt, die Trübungsverhältnisse und das Wachstum von Bakterien, Algen, Makrophyten oder Zooplankton. Diese Prozesse, die auch den ökologischen Zustand eines Gewässers charakterisieren, sind ihrerseits von der hydrodynamischen und morphologischen Entwicklungsgeschichte des Gewässers abhängig, also von den abiotischen Systemzuständen, die bei wasserbaulichen Systemstudien von der BAW berechnet werden. Eine Rückkopplung ist z.B. zu den kohäsiven Eigenschaften der Sedimente gegeben, die maßgebend für die Schwebstoffdynamik sind. Eine vollständig gekoppelte Simulation von Hydrodynamik/Sedimenttransport und Wasserqualität ist nicht Stand der Technik. Aussagen zu diesen Prozessen werden meistens von verschiedenen Experten auf der Grundlage verschiedener Modelle getätigt, welche die Prozesse in ihren Wechselwirkungen nicht ausreichen berücksichtigen.

1.2 Bedeutung für die WSV

Eine enge Kopplung bei der Simulation von Hydrodynamik/Sedimenttransport und Wasserqualität verbessert prinzipiell beiderseits die Qualität der Modellergebnisse. In Anbetracht langer Simulationszeiträume mit wechselnden Bedingungen, z.B. für das Sedimentangebot und der Temperaturverteilung im Gewässer, gewinnt die Berücksichtigung der Interaktionen mit Gewässergüteparametern an Bedeutung. Als ein weitbekanntes Beispiel sei das alljährliche Auftreten des Sauerstoffloches in der Tidelbe genannt.

Gewässergütemodelle und andere darauf aufbauende ökologische Modelle sind auch im Zusammenhang mit den Vorgaben der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) bedeutsam. Hier könnte ein Beitrag zu einer konsistenten Bearbeitung von wasserbaulichen und ökologischen Fragestellungen geleistet werden.

Ferner besteht eine Verbindung zur zukünftigen morphodynamischen Entwicklung von Bundeswasserstrassen an sich, als Folge von Baumaßnahmen oder Unterhaltungsstrategien oder als Folge des Klimawandels. Die morphologische Entwicklung der Gewässersohle kann die Sicherheit und Leichtigkeit der Schifffahrt gefährden und verursacht Baggerkosten. Bei der Auswahl von subaquatischen Verbringstellen müssen auch umweltrelevante Aspekte berücksichtigt werden.

1.3 Untersuchungsziel

Langfristig soll ein Wassergütemodul in die Simulationsumgebung der BAW integriert werden um den Anwendungsbereich der Ästuarmodelle der BAW zu verbessern und zu erweitern. Da die morphodynamischen Prozesse in den Ästuaren einen herausragenden Einfluss auf alle relevanten ökonomischen und ökologischen Ästuarfunktionen ausüben, ist es für die BAW Dienststelle Hamburg unbedingt erforderlich, zukünftig den Einfluss der Wasserqualität auf die Morphodynamik berücksichtigen zu können. Hierfür sollen zunächst verfügbare Pakete auf deren Eignung untersucht, erste Erfahrungen mit der Simulation der Wasserqualität in Ästuaren gesammelt, sowie konzeptionelle Überlegungen zur Integration der Wasserqualität in HN-Verfahren der BAW durchgeführt werden.

2 Untersuchungsmethoden

Numerische Modellierung

3 Ergebnisse

Die Literaturrecherche und erste Erfahrungen in der Anwendung des Gewässergütemoduls DELWAQ hat ergeben, dass diese Software geeignet ist, für die genannte Fragestellung eingesetzt zu werden und auch in die Modellierungsumgebung von UnTRIM integriert werden könnte.

In Bild 1 ist mit einer Verteilung des gelösten Sauerstoffes in der Tideelbe ein erstes wichtiges Modellergebnis dargestellt. Man erkennt das Absinken der Sauerstoffkonzentration im Bereich des Hamburger Hafens („Sauerstoffloch“).

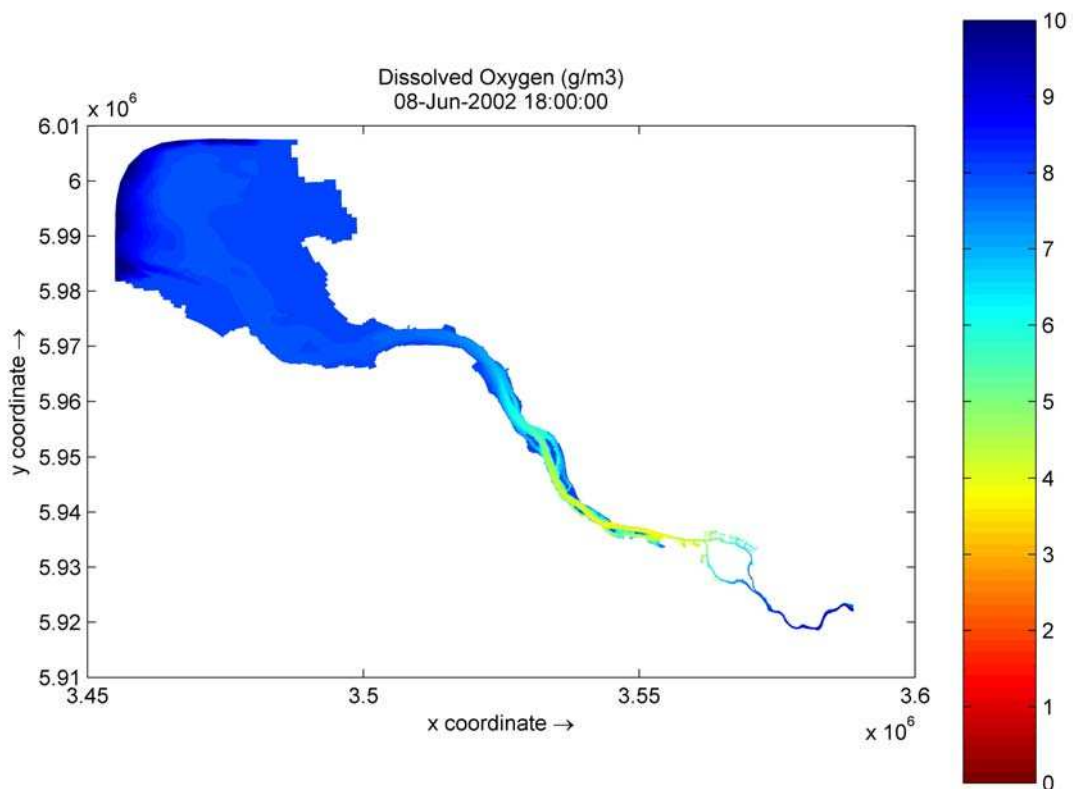
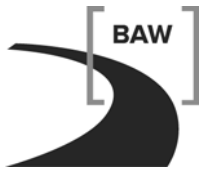


Bild 1: Verteilung gelösten Sauerstoffes in der Tideelbe

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Arbeitsprogramm ist zunächst für 18 Monate angelegt. Danach müssen Entscheidungen über das weitere Vorgehen getroffen werden. Es umfasst folgende Punkte:

1. Literaturrecherche über relevante Modellverfahren zur Simulation der Wasserqualität.
 - Detaillierter Vergleich der konzeptionellen Modelle, insbesondere der Pakete WAQ, ECO, GEM und QSIM.
 - Bewertung der Pakete hinsichtlich des für die Simulation der Wasserqualität in Ästuaren erforderlichen Funktionsumfangs.
 - Bewertung der Pakete hinsichtlich deren Eignung zur Kopplung mit hausinternen HN-Verfahren, z.B. UnTRIM (mit und ohne SubGrid).
2. Beschaffung des zur Delft3D-Software gehörenden Gewässergütemodells DELWAQ. Anwendung auf verschiedene ortsspezifische Ästuarmodelle (Ems, Elbe) . Prüfen und Bewerten der Simulationsergebnisse.



3. Konzeptionelle Vorarbeiten zur Integration eines Gewässergütemoduls in die Simulationsumgebung der BAW:
- Auswahl eines verfügbaren Pakets für die Integration.
 - Aufzeigen der funktionalen Abhängigkeiten zu sedimentologischen Teilprozessen.
 - Definition der Schnittstellen zu vorhandenen Software-Paketen (UnTRIM, SediMorph).
 - Anforderungen an die Erweiterung von Gewässergütemodellen zur Berücksichtigung der SubGrid-Technologie des mathematischen Verfahrens Untrim² formulieren. Konsequenzen für bestehende Pakete aufzeigen, z.B. Neuprogrammierung SediMorph².

Zeitplan:

12/2010-02/2011: Punkt 1 des Arbeitsprogramms
03/2011-11/2011: Punkt 2 des Arbeitsprogramms
12/2011-05/2012: Punkt 3 des Arbeitsprogramms

Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE

Netzplan-Nr.: A39550670400

Projektleiter: Dr.-Ing. Rainer Lehfeldt, Dienststelle Hamburg, Geschäftsstelle KFKI

E-Mail: rainer.lehfeldt@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

In den letzten Jahren haben sich Standards und Technologien im Umfeld von Informationssystemen etabliert, die eine Kommunikation zwischen heterogenen und verteilten Datenhaltungen unterstützen. Dazu gehört der ISO19115-Standard für Metadaten, der ISO19119-Standard für Services, die CS-W-Schnittstelle für Katalog-Dienste zur Kommunikation zwischen Metadaten-Servern und die OGC-konformen Darstellungs-Dienste WMS, WFS, WPS und WCS für Daten aus Geoinformationssystemen.

Diese Grundlagen werden in allen nationalen und internationalen Informations-Systemen angewandt. Als Beispiele seien hier die Nationale Geodateninfrastruktur GDI-DE und das Umweltportal Deutschland PortalU angeführt. Im „Blaubuch zu einer integrierten Meerespolitik“ [EC, 2007] werden als gegenwärtige Herausforderungen die Optimierung der nachhaltigen Verwaltung von Meeresdaten und insbesondere der Kartierung der Gewässer sowie die Einbeziehung von Meeresbeobachtungssystemen genannt. Dabei spielen die Harmonisierung der Daten und deren Interoperabilität bei der Zusammenführung zu integrierten Darstellungen u.a. für das nationale Berichtportal WasserBLiCK eine wesentliche Rolle.

Derzeit besteht noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die vorhandenen und zukünftig durch Projekte wie COSYNA flächendeckend erhobenen Küstendaten in vernetzte Informationssysteme einzubinden, darüber bereitzustellen und nutzbar zu machen. Dies gilt auch für Untersuchungsszenarien mit numerischen Modellen bei der BAW.

1.2 Bedeutung für die WSV

Durch eine geeignete Vernetzung der Datenquellen wird es zukünftig möglich, in einem ökonomisch vertretbaren Aufwand die umfassende Bereitstellung von Fachdaten und Informationen aus dem Küsten- und Meeresbereich für Wissenschaft, Planung, Öffentlichkeit, Politik und Verwaltung gemäß den Anforderungen an eine integrierte europäische Meerespolitik [EC, 2007] umzusetzen.

Die in NOKIS [Lehfeldt, R., et al., 2006] und bei der GDI-BSH [Melles, J., et al., 2006] verwendeten Konzepte und Methoden erfüllen bereits heute die international festgelegten Standards. Durch die Zusammenführung dieser sich ergänzenden Technologien werden die Küsten- und Meeres-Dienststellen bei der Erfüllung von EU-Anforderungen wie der INSPIRE-Richtlinie [EPC, 2007] und der Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie [EP, 2008] entlastet. Wichtige Voraussetzungen zum Aufbau der nationalen Geodatenbasis NGDB [IMAGI] werden erfüllt.

Mit den geplanten synoptischen Verzeichnissen mariner Datenbestände wird auf einer einheitlichen fachlichen Datengrundlage ein standardisierter Zugang zu Fachdaten realisiert, der die Partnerdienststellen von Dienstleistungs-Routearbeiten entlastet. Die in der MDI-DE zusammengeführten Informationen bilden das qualitätsgesicherte Informationsangebot zur deutschen Küstenzone von Nord- und Ostsee sowie der angrenzenden Meeresgebiete. Insbesondere sind die Schnittstellen zur Bereitstellung von Daten für INSPIRE, die GDI-DE und PortalU wesentliche Komponenten dieser Infrastruktur, die das Informationsangebot der beteiligten Partner einer größeren Nutzerschaft zugänglich machen.

1.3 Untersuchungsziel

Die Zusammenführung von Informationen aus den thematisch und sektoral ausgerichteten Aufgabenbereichen des KFKI, des Meeresschutzes, des marinen Naturschutzes, der Raumordnung sowie der Küstenforschung bedarf der Vernetzung der wesentlichen Datenquellen an der Küste. Ziel des Projektes ist es, die Entwicklungen von Informationssystemen beim BSH (GeoSeaPortal - Geodaten für Meer

und Küste) und das gemeinsam von Bundes- und Küstendienststellen aufgebaute Nord-Ostsee-Küsten-Informations-System (NOKIS) sowie weiterer Informationssysteme mit unmittelbarem Bezug zu Meer und Küste in konzeptioneller, technologischer und inhaltlicher Form zu einem übergreifenden, nationalen Meeres- und Küsteninformationssystem zusammenzuführen.

2 Untersuchungsmethoden

Um die Anforderungen von INSPIRE zu erfüllen, sind einheitliche, grenzüberschreitende Datenmodelle erforderlich, die bisher nicht verfügbare blattschnittfreie Datenbestände voraussetzen. Auf der Basis von Metadaten sollen zunächst **synoptische Verzeichnisse mariner Datenbestände** zur Hydrographie, zu ökologischen Parametern sowie zu Nutzungen und Belastungen angelegt werden, die vorhandene verteilte Datenhaltungen gemeinsam zugänglich machen.

Einheitliche Datengrundlagen für Modellierung, Analysen und Visualisierungen beinhalten zunächst die syntaktische Interoperabilität von Daten mit kompatiblen Formaten und standardisiertem Zugang.

Das **Portal** soll als gemeinsamer Zugang der Einstiegspunkt zu Daten und Informationen aus der deutschen Küstenzone und der angrenzenden Meeresgebiete werden und folgende Funktionalität bereitstellen:

- Recherche unter Verwendung von Thesaurus und Gazetteer,
- Intersektoral gleichartige Strukturen zur interdisziplinären Sicht auf die marinen Daten,
- Web-Services und Download zum Datenzugriff,
- Realisierung eines exemplarischen Auswertungsdienstes.

Das MDI-DE Portal wird durch den Aufbau eines Netzwerks für Meeresdaten von Datenbeständen an lokalen Knoten gespeist. Der in NOKIS aufgebaute lokale Knoten für Schleswig-Holstein soll als Prototyp für weitere Implementierungen in den Küstenländern entwickelt werden.

Die MDI-DE stellt **Dienste** von Partnern zur Verfügung, die bei wasserbaulichen, raumplanerischen, naturschutzfachlichen, wissenschaftlichen und ökologischen Systemanalysen sowie zur Unterstützung der Schifffahrt verwendet werden.

3 Ergebnisse

Das neue Portal Meer und Küste wird dauerhaft beim BSH unterhalten. Die Freischaltung des Portals ist für April 2012 vorgesehen. Bis dahin werden die Ergebnisse der vier Teilprojekte unter der URL www.mdi-de.org präsentiert. Auf öffentlichen Workshops (13. Oktober 2011, 15./16. Mai 2012) werden die gewählten Ansätze und Methoden externen Fachkollegen vorgestellt und mögliche weitere Kooperationen diskutiert.



Bild 1: Das Netzwerk der Marinen Dateninfrastruktur in der deutschen Küstenzone [Lehfeldt, R., Melles, J., 2011].

Antragsteller A1: BAW, A2: BSH, A3: BfN, A4: Uni Rostock. Partner P1: LKN, P2: NLWKN, P3: NLPV, P4: WSD NW, P5: WSD N, P6: LLUR, P7: LUNG.

In 2011 sind vor allem die Anforderungen an das zukünftige Portal definiert worden, so dass vom BSH ein Software-Entwicklungsauftrag dazu erteilt werden konnte. Seitens der BAW wurden 6 MitarbeiterInnen eingestellt, die in den Bundesdienststellen BAW (2), WSA Hamburg und den Landesbetrieben NLWKN, NLPV in Niedersachsen und LKN in Schleswig-Holstein eingesetzt sind. Ein Mitarbeiter in der BAW pflegt die genannte Webseite, um den Fortschritt der Aufbereitung von Daten mit den Webtechnologien WMS, WFS für Daten-Visualisierung und –Zugriff sowie CS-W für die Recherche mit Metadaten zu dokumentieren.

In der BAW sind sämtliche Daten für das KFKI Projekt AufMod sowie Daten aus der Elbe-Modellierung, die im Portal Tideelbe verwendet werden, über die MDI-DE verfügbar. Beim WSA Hamburg wurde das Planungsmaterial der KFKI Arbeitsgruppe „Synopsis“ zu Seevermessungen von Bundes- und Landes-Behörden aus den Jahren 2004 bis 2010 als Kartendienst aufbereitet. Zusammen mit dem LKN wurden die bereits im Projekt NOKIS++ begonnenen Arbeiten zu einem deutschen Küsten-Gazetteer wieder aufgenommen.

Bei der konkreten Zusammenführung von Daten aus verschiedenen Quellen stellt die technische Interoperabilität von flächenhaften Daten auch aus numerischen Simulationsmodellen keine besondere Hürde dar. Die Hauptarbeit liegt in der inhaltlichen Harmonisierung der Daten, d.h. Vereinheitlichung von Legenden, Referenzsystemen und Darstellungsfarben. Beim BSH wurde für die MSRL der Deskriptor 5 zur Eutrophierung (vom Menschen verursachte Nährstoffanreicherung in Gewässern) als Geodatendienst realisiert. Die Daten stehen als Kartendienste, die unterschiedlich visualisiert werden können, zur Verfügung.

Das Netzwerk der MDI-DE wird von Infrastrukturknoten [Lehfeldt, R., et al., 2011] bei der BAW, dem BSH und bei den Küstenländern Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern getragen. Die Erstellung des Knotens für das BfN wird zur Zeit ausgeschrieben. An diesen Infrastrukturknoten werden die Hard- und Software einer lokalen Serverarchitektur, mit der (Geo-)Daten und Metadaten verwaltet und über standardisierte Dienste bereitgestellt werden, eingerichtet. Um es zukünftigen Partnern der MDI-DE einfacher zu machen, einen Infrastrukturknoten aufzubauen, wird ein entsprechender Leitfaden ausgearbeitet.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die weitere Planung bei BAW, BSH und BfG sieht vor, dass im Jahr 2012 folgende Aufgaben im Projekt MDI-DE bearbeitet werden sollen:

- Wichtigstes Ziel für das Jahr 2012 ist die Freischaltung des MDI-DE Portals im Internet.
- Die Infrastrukturknoten bei den Projektpartnern sollen fertig gestellt werden.
- Weitere Dienste sollen in das MDI-DE Portal integriert werden.
- Der Küsten- Gazetteer und ein Thesaurus sollen im Portal zur Verfügung gestellt werden.
- Die Metadatenprofile sollen weiter ausgearbeitet werden, so dass z.B. Modelle und Zeitreihen besser beschrieben werden können.
- Es soll verstärkt an dem Aufbau von Infrastrukturknoten bei den Kooperationspartnern (UBA, HZG, AWI, vTI, ...) gearbeitet werden.
- Das vom BSH entwickelte Werkzeug „DataDiver“ zur Visualisierung von Zeitreihen, Profilen und Schnitten soll, basierend auf einem SOS-Dienst in das MDI-DE Portal, eingebunden werden.
- Als weiterer MSRL-Deskriptor soll die „Biologische Vielfalt“ bearbeitet werden.
- Mit dem Aufbau einer Schnittstelle zum „Wasserblick“ bei der BfG soll begonnen werden.

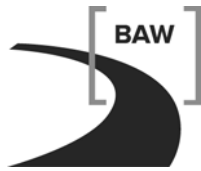
5 Literatur

COSYNA - Coastal Observing System for Northern and Arctic Seas (www.cosyna.de).

EUROPEAN PARLIAMENT AND COUNCIL, EPC (2007): Directive 2007/2/EC establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Official Journal of the European Union L108, pp. 1-14.

European Commission, EC (2007): Blue Book on an Integrated Maritime Policy in the EU, 16p (http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/pdf/BlueBook_IMP/EN_IMP_communication_final_COM_575.pdf).

- Europäisches Parlament und der Rat der Europäischen Gemeinschaft, EP (2008): Richtlinie 2008/56/EG zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für Maßnahmen der Gemeinschaft im Bereich der Meeresumwelt (Meeresstrategie-Rahmenrichtlinie). Amtsblatt der Europäischen Union, L 164/19-40.
- IMAGI - Interministerieller Ausschuss für Geoinformationswesen (http://www.gdi-de.org/de/imagi/f_imagi.html).
- Lehfeldt, R.; Melles, J.; Bauer, M. (2011): Concept And Implementation Of The German Marine Data Infrastructure. In: Roger Longhorn und Stefania de Zorzi (Hrsg.): Proceedings of CoastGIS 2011: 10. International Symposium on GIS and Computer Mapping for Coastal Zone Management. Marine and Coastal Spatial Planing, Vol.2. Venezia: Corila, pp. 50-54.
- Lehfeldt, R., Melles, J. (2011): Die Marine Dateninfrastruktur Deutschland MDI-DE. In Traub, K.-P., Kohlus, J., Lüllwitz, T. (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone - Band 3. Points Verlag Norden Halmstad, pp. 107-116.
- Lehfeldt, R., Heidmann, C., Reimers, H-C., Kohlus, J., von Weber, M. (2006): NOKIS - Nord- und Ostsee KüstenInformationsSystem - Netzwerk der Metadaten. In: Traub, K.-P. & Kohlus, J. (Hrsg.): GIS im Küstenzonenmanagement. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, pp.150-160.
- Melles, J., Soetje, K. C. (2006): Die GDI-BSH und das Nautisch-Hydrographische Informationssystem (NAUTHIS). In Traub, K.-P. & Kohlus, J. (Hrsg.): Geoinformationen für die Küstenzone. Beiträge des 1. Hamburger Symposiums zur Küstenzone. Wichmann, Heidelberg, pp. 118-124.
- WasserBLiCK - Bund-Länder-Informationportal der Bundesrepublik Deutschland zum Themenschwerpunkt Europäische Wasserrahmenrichtlinie (<http://www.wasserblick.net>).



III. Neue FuE-Vorhaben in 2011

Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke (SiBeWa)

Netzplan-Nr.: A39510070001

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

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

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die derzeit in Deutschland gültigen Bemessungsnormen gelten für Neubauten oder neu anzufertigende Bauteile. Die Normen enthalten das semi-probabilistische Sicherheitskonzept, bei dem die Streuungen von Einwirkungen (z.B. Lasten) und Widerständen (z.B. Material-Festigkeiten) jeweils über charakteristische Werte und Teilsicherheitsbeiwerte zu Bemessungswerten führen, die in einer Grenzzustandsgleichung $E_d < R_d$ das gewünschte Sicherheitsniveau (z.B. nach DIN 1055-100 oder DIN EN 1990) sicher stellen. Bestehende Wasserbauwerke genügen vielfach nicht mehr den aktuellen Normen, die Fortschreibungen und Erkenntniszuwächse sowie auch neue Zuverlässigkeitskonzepte enthalten. Anders als bei Neubauten, bei denen Unsicherheiten in Planung, Errichtung, Einwirkungen und Tragvermögen aggregiert zu berücksichtigen sind, können bei bestehenden Bauwerken gesellschaftlich adäquate Zuverlässigkeitsziele sowie qualifizierte Zustandsaufnahmen und Erfahrungen (z.B. Geometrie, Kenntnisse über das statische System, Messungen von Einwirkungen, Erkundung von Materialeigenschaften, ...) als Erkenntnisse genutzt werden, um die Unsicherheiten zu reduzieren.

In verschiedenen Bereichen sind Dokumente für die Nachrechnung von bestehenden Bauwerken erarbeitet worden (z. B. Richtlinie DS 805 der Deutschen Bahn für Bahnbrücken, Reihe SIA 269 für schweizer Hochbauten, Dokumente des JCSS (Joint Committee for Structural Safety) für bestehende Hochbauten, Nachrechnungsrichtlinie der Brückenbauverwaltung in Deutschland), die aber insgesamt nicht direkt auf Wasserbauwerke übertragbar sind. Einzelne Ansätze lassen sich jedoch übernehmen.

Nach derzeitigem Kenntnisstand existiert für bestehende Wasserbauwerke keine Regelung für eine aktualisierte Bewertung auf dem Stand der Technik.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die bestehenden, im Mittel rund 60 Jahre alten Wasserbauwerke der WSV (Wasser- und Schifffahrtsverwaltung) genügen wegen der Änderungen in den einschlägigen Regelwerken vielfach nicht mehr den allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.d.T.) nach z.B. §3 MBO bzw. §48 WaStraG. Diese a.a.R.d.T. sind für neue Bauwerke und Bauteile konzipiert. Eine Mehrzahl der Wasserbauwerke dürfte daher mit diesen Regelwerken schwer nachzuweisen sein, obwohl diese Bauwerke keine signifikanten Auffälligkeiten zeigen.

Die Abhilfe des zunächst „rechnerischen“ Defizits:

- Stilllegung, Abriss des Bauwerks und Neubau, ggf. mit temporärer Unterbrechung von Wasserwegen,
- Grundinstandsetzung des Bauwerks, ebenfalls mit ggf. temporärer Unterbrechung von Wasserwegen

übersteigt die Sachmittel- und Personalressourcen der WSV und ließe sich in überschaubarer Zeit nicht bewältigen. Zudem würde die Schifffahrt zum Teil sehr stark behindert werden. Im Fall eines Versagens derartiger Bauwerke wären aber auch Nachteile der WSV als Baulastträger zu befürchten.

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben wurde im September 2011 begonnen. Eine erste Literatur-Recherche zum Stand von Sicherheitskonzepten im Allgemeinen sowie zu Gremienarbeiten im Bereich von Sicherheitskonzepten für bestehende Bauwerke liegt vor.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2011:

- Literaturstudium
- Aufbereitung der Zuverlässigkeitstheorie nach DIN 1055-100 bzw. EN 1990

2012:

- Ermittlung der Zielzuverlässigkeit für bestehende Bauwerke (beta-Index)
- Gedanken über Modellunsicherheiten auf Einwirkungs- und Widerstandsseite,
- Überlegungen und Analysen zu den für (Verkehrs-)Wasserbauwerke relevanten Verteilungen für Einwirkungen und Widerstände, Datenaufbereitung und -auswertung,

2013:

- Ableitung/Kalibrierung von (modifizierten) Teilsicherheitsbeiwerten nach der Zuverlässigkeitsmethode I. Ordnung (FORM/SORM),
- Vergleichsrechnungen für ausgewählte Fälle mit der voll-probabilistischen Methode,
- Zuverlässigkeitstheoretische Bewertung von nach früheren Normen erstellten (Verkehrs-)Wasserbauwerken,

2014:

- Anwendung des entwickelten Sicherheitskonzeptes SiBeWa für Schleusen- und Wehrbauwerke; Tastberechnungen, Berechnungen, Überprüfung der Modelle,
- Mitwirkung bei der Erarbeitung einer BAW-Richtlinie „Sicherheit Bestehender Wasserbauwerke (SiBeWa).

Ein Abschluss des Vorhabens wird zum Ende des Jahres 2014 angestrebt.

Zwangsbeanspruchung bei dicken, gerissenen Stahlbetonquerschnitten

Netzplan-Nr.: A39510170002

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

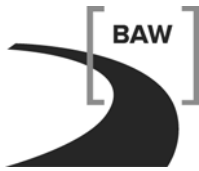
Ziel ist es, durch Versuche, Auswertung von insitu-Messungen und Berechnungen zu einem mechanisch konsistenten Bemessungsmodell für die Zwangsbeanspruchung zu kommen, das alle Phasen des Bauwerkslebens abdeckt (früher Zwang, später Zwang, Überlagerung Last).

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

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



4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2011: Literatur- und Internetrecherche, Planung der Versuche, Zusammenstellung durchgeführter insitu-Messungen
- 2012: Durchführung und Auswertung der Versuche, Aufstellen numerischer Modelle, Tastberechnungen, Auswertung der insitu-Messungen
- 2013: Weitere Versuche, Auswertung weiterer Messungen, Berechnungen, Aufstellen des Ingenieurmodells
- 2014: Berechnungen, Überprüfung des Modells, Auswertung, Zusammenstellung

Korrosionseigenschaften von Spundwandstählen

Netzplan-Nr.: A39510270003

Projektleiter: Johannes Ruppert, Bautechnik, Referat Stahlbau und Korrosionsschutz, B2

E-Mail: johannes.ruppert@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

Erste Schritte waren Beschaffung, Aufbau und Inbetriebnahme der Korrosionsmesszelle (KMZ) und einer Schleifmaschine für metallographische Versuche. Ergänzt wurde die Korrosionsmesszelle durch ein Zusatzgerät zur Online-Bestimmung verschiedener Wasserparameter (pH-Wert/Sauerstoffgehalt). Die Probevorbereitung wurde optimiert indem verschiedene Probekörperabmessungen und Gießharze getestet wurden. Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit (R_z) auf die spezifische Probenoberfläche und die auftretenden Korrosionsströme wurde untersucht. Der Einfluss der Korrosion an den Schnittkanten der Probekörper (Spalteffekte) wurde durch Lackieren der Probe vor dem Eingießen minimiert.

Bei den ersten Versuchen in der KMZ wurden verschiedene Messparameter wie unterschiedliche Immersionsmedien (Demineralisiertes Wasser, Karlsruher Leitungswasser und synthetisches Meerwasser nach DIN 50905-4; 1987) oder Messzeiten für das Ruhepotential (Open-Circuit-Measurement) untersucht.

Parallel dazu wurden erste Langzeitversuche von Baustahlproben (S235) in unterschiedlichen Konzentrationen von Natriumchlorid-Lösungen (1 bzw. 4 Monate) durchgeführt und ausgewertet. Die gebildeten Rostphasen wurden mittels FTIR und die Konzentration des gelösten Eisens in den Natriumchlorid-Lösungen mittels AAS analysiert. Es bildete sich in allen Lösungen, trotz der teils hohen Chloridkonzentrationen Lepidokrokit (γ -FeOOH) und Magnetit aber kein Akaganeit (β -FeOOH) welcher sich bei hohen Chloridkonzentrationen, allerdings nur im sauren Milieu, bilden kann [U. Schwertmann, R. M. Cornell, 2000].

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Vollständige Installation der Korrosionsmesszelle und Sichtung vorhandener und relevanter Untersuchungen und Veröffentlichungen. Durchführung von Pilotversuchen mit der Korrosionsmesszelle wobei Grundlagenversuche zur Optimierung der Probenpräparation durchgeführt werden (2011-2012).

Begutachtung verschiedener Immersionsmedien und Erstellen eines Rankings relevanter, physikochemischer Gewässerparameter unter möglicher Berücksichtigung der Aspekte mikrobiell induzierter Korrosion. Langzeitversuchsreihen zur Untersuchung der Bedeutung der verschiedenen Wasserparameter bei der Korrosion. Zusätzliche Versuche in der Korrosionsmesszelle mit unterschiedlichen Stahlproben und synthetischen See-, Brack- und Flusswasser bzw. Wasserproben von vor Ort (2012 bis Ende 2014).

5 Literatur

- Dr. G. Binder, U. Gabrys; Bewertung der Korrosion von Spundwänden; FuE-Forschungsvorhaben der BAW; A39510210108, 2011
- C. Houyoux et.al; Design method for steel structures in marine environment including the corrosion behaviour; Technical steel research, 2007
- U. Schwertmann, R. M. Cornell; Iron Oxides in the Laboratory; Wiley-VCH, 2000

Filterstabilität grober Gesteinskörnungen

Netzplan-Nr.: A3952047001

Projektleiter: Jürgen Stein, Geotechnik, G4

E-Mail: juergen.stein@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Eine Standard Bauweise zur Sicherung der Böschungsufer an den Bundeswasserstraßen ist die Schüttung loser Wasserbausteinen auf einem Kornfilter. Um eine langfristige Deckwerksstabilität zu gewährleisten, muss die Körnungslinie des Kornfilters auf die Größe der Deckwerkssteine abgestimmt sein. Der feinkörnigere Kornfilter darf nicht in die Poren der Deckschicht eindringen. Gleichzeitig muss er den darunter anstehenden Boden zurückhalten.

Die hydraulischen und mechanischen Vorgänge bei der Durchströmung der Deckwerke durch die Wellenbelastung aus der Schifffahrt sind weitestgehend unbekannt und sollen mit diesem FuE Vorhaben untersucht werden. Mit Hilfe der Erkenntnisse sollen die aus der Literatur bekannten Filterregeln auf sehr grobe Gesteinskörnungen erweitert oder ggf. neue Regeln formuliert und auf die Bemessung von Filterstufen für die Wasserbausteinklassen der TLW 2003 angewendet werden. Die Filter werden derzeit nach MAK 1989 bemessen. Das Merkblatt wird zurzeit überarbeitet.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die Deckwerke sind ein großes Anlagevermögen der WSV. Durch die Ergebnisse der Untersuchungen soll die Bemessung der Deckwerke optimiert und die Unterhaltungsaufwendungen minimiert werden. Mit den Untersuchungen können die Einflüsse der Schifffahrt auf die Deckwerke genauer bestimmt werden. Die Entwicklung eines neuen und auf die groben Gesteinskörnungen angepassten Berechnungsansatzes zur Bemessung der Kornfilter führt zu einer sichereren und wirtschaftlicheren Durchführung von Baumaßnahmen an Bundeswasserstraßen.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen ist die Erforschung der hydraulischen und mechanischen Vorgänge im Filter und im Deckwerk mit Hilfe von Modellversuchen und numerischen Berechnungen. Es sollen Filterregeln für sehr grobe Gesteinskörnungen entwickelt und auf die Bemessung neuer Filterstufen für die neuen Wasserbausteinklassen der TLW 2003 angewendet werden.

2 Untersuchungsmethoden

Um die komplexen Strömungsverhältnisse im Modellversuch möglichst realitätsnahen abzubilden, sind großmaßstäbliche Versuche auf dem BAW Gelände geplant. Deckwerke aus unterschiedlich gekörnten Wasserbausteinen und Kornfiltern werden in einem Probekasten eingebaut. Dieser wird in einem Tauchbecken zur Simulation der Strömungs- und Wellenbelastung zyklische auf und ab bewegt.

Der Kasten kann für den Einbau der Messtechnik und zur Begutachtung nach den Versuchen an den Seitenwänden geöffnet werden. Zusätzlich erhält er Sichtfenster zur Beobachtung der Bewegung des Filtermaterials. Zur Ermittlung der geohydraulischen Randbedingungen wird er mit Porendruckwassergebern in mehreren Ebenen (Boden, Filter, Deckwerk) und Gebern zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit instrumentiert.

Zur Verifizierung der Modellversuche soll der Prozess an einer Kanalstrecke in situ beobachtet und messtechnisch erfasst werden. In ein Böschungsdeckwerk, voraussichtlich an der Neubaumaßnahme am DEK Los 8, werden Porenwasserdruckgeber in mehreren Tiefenlagen, z. B. in der Basis, im Filter und im Deckwerk eingebaut. In mehreren Messkampagnen werden Messdaten erfasst. Die Körnungslinien der Materialien vor Ort werden bestimmt und mögliche Veränderungen aufgrund der Wellenbelastung dokumentiert. Die Ergebnisse werden zur Validierung der numerischen Berechnungen herange-

zogen. Die Messungen am DEK Los 8 können erst durchgeführt werden, wenn die Baumaßnahme abgeschlossen ist.

Für theoretische Betrachtungen und zur Simulation sollen numerische Strömungsberechnungen durchgeführt werden. Im Allgemeinen sind dreidimensionale, instationäre Strömungsvorgänge mit den vorhandenen komplexen Randbedingungen sehr aufwändig und zeitintensiv und erfordern eine große Rechenleistung. Zur Bewältigung werden daher in der Berechnungspraxis zumeist vereinfachende Annahmen getroffen. Die Recherche nach einem geeigneten Verfahren hat ergeben, dass zurzeit noch keine geeignete Methode zur Berücksichtigung aller physikalischen Vorgänge vorhanden ist. An der BAW wurde deshalb ein Arbeitskreis Numerik gegründet. Eine neue Mitarbeiterin wird an der BAW mit Hilfe neuer Rechenverfahren die Fragestellung bearbeiten.

3 Ergebnisse

Die Versuchseinrichtung wurde entworfen und in den Werkstätten der BAW gebaut. Zur Auswahl einer geeigneten Messtechnik wurden Vorversuche zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit und des Porenwasserdrucks durchgeführt. In der Wellengrube der BAW wurde mit einem Endoskop die Strömung in den Steinszwischenräumen visualisiert. Für die Ausstattung des Versuchskastens wurden Porenwasserdruckaufnehmer, Sonden zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit, Erddruckkissen und ein Seilsensor für die Tauchtiefe beschafft. Zurzeit wird die Messtechnik installiert. Modellversuche in dem Probekasten wurden noch nicht durchgeführt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012:

- Durchführung erster Modellversuche im Tauchbecken
- Durchführung einer Messkampagne an einer Versuchsstrecke
- Auswertung und Vergleich der Messergebnisse
- Machbarkeitsstudien mit numerischen Modellen

2013:

- Durchführung weiterer Modellversuche
- Verfeinerung der numerischen Modellierung mit Anpassung an die Strömungsszenarien der Naturmessungen
- Durchführung weiterer Berechnungen und Parameterstudien
- Auswertung und Interpretation der Modellversuche, Naturmessungen und numerischen Berechnungen
- Anpassung und Entwicklung von Filterkriterien und Modellgesetzen zur Berechnung der Filterstabilität
- Ggf. Formulierung von weiterem Entwicklungsbedarf
- Erstellung eines Abschlussberichtes

Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit

Netzplan-Nr.: A39520470002

Projektleiterin: Jeannine Eisenmann, Geotechnik, G4

E-Mail: jeannine.eisenmann@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Um die Standsicherheit technisch-biologischer Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen zu gewährleisten, müssen ihre Dauerhaftigkeit und die Belastbarkeit quantifizierbar sein. Es stellt sich die Frage, wie eine technisch-biologische Ufersicherung die Aufgabe eines rein technischen Deckwerks übernehmen kann: eine Filterschicht wird benötigt, die den anstehenden Boden vor Erosion schützt. Daneben muss die Ufersicherung eine Lagestabilität gegenüber Strömungs- und Wellenangriff aufweisen. Die Böschung muss vor destabilisierenden Einwirkungen des u.U. auftretenden Porenwasserüberdrucks gesichert werden. So zielt die spezielle Fragestellung zum einen auf den Einfluss der technisch-biologischen Ufersicherung bzw. des durchwurzelten Bodens auf dessen Festigkeit, Erosivität und Durchlässigkeit ab. Zum anderen darauf, wie die technisch-biologische Ufersicherung die Böschung vor Versagensmechanismen schützen kann, die durch den Porenwasserüberdruck initiiert werden.

Grundlage sind unter anderem die bisherigen Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt (Projektnummer 8186) (Fleischer, P. et al. (2006, 2008)). Erfahrungen zu den von technisch-biologischen Ufersicherungen aufnehmbaren Fließgeschwindigkeiten bzw. Schubspannungen liegen bisher nur für kleine Fließgewässer ohne Schifffahrt vor (Gerstgraser, C. (2000), Rauch, H.-P. (2006)). Die Ergebnisse sind nur bedingt auf Wasserstraßen übertragbar.

1.2 Bedeutung für die WSV

In der WSV kommt der Gewährleistung der Standsicherheit der Ufer große Bedeutung zu. Da die natürliche Ufergestaltung von Binnenwasserstraßen mit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie zunehmend an Bedeutung gewinnt, sollen verstärkt technisch-biologische Ufersicherungen zur Anwendung kommen. Für technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen gibt es derzeit noch keine allgemeinen Bemessungsregeln. Die Untersuchungen sollen in Verbindung mit den Ergebnissen aus dem Forschungsprojekt 8186 eine Grundlage für die Entwicklung von Bemessungsregeln für technisch-biologische Ufersicherungen bieten.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen ist die theoretische und modelltechnische Erforschung der Wirkung technisch-biologischer Ufersicherungen hinsichtlich geotechnischer und hydraulischer Aspekte. Quantifizierungen der Belastungsresistenz technisch-biologischer Ufersicherungen gegenüber schifffahrtsinduzierten hydraulischen Einwirkungen sollen stattfinden. Mit Hilfe von theoretischen Betrachtungen soll eine weitere Grundlage für Standsicherheitsnachweise geschaffen werden.

2 Untersuchungsmethoden

Hauptuntersuchungsmethoden sind Modell- und Laborversuche: Die Untersuchungen der geotechnischen Aspekte beinhalten die für die Standsicherheit maßgebenden Festigkeitsparameter. Auch der sich unter Absink ausbildende Porenwasserüberdruck, welcher von der Durchlässigkeit des Bodens abhängt, ist Untersuchungsgegenstand. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Erosionsstabilität des durchwurzelten Bodens unter Wellen- bzw. Strömungsangriff. Unter den hydraulischen Aspekten wird die Reduktion von Strömungsgeschwindigkeiten und Wellenhöhen durch ingenieurbologische Ufersicherungen erfasst.

In einem Wellenbecken (s.

Bild) können großmaßstäblich Wellenbelastungen auf eine Uferböschung aufgebracht werden, so dass hier technisch-biologische Bauweisen, wie z. B. Weidenspreitlagen oder vorgefertigte Elemente wie

Vegetationsmatten, getestet werden. Einwirkungen wie Wellenhöhen, sich ausbildender Porenwasserdruck, Wellengeschwindigkeiten werden gemessen und Widerständen wie z.B. der Scherfestigkeit der Boden-Wurzelmatrix gegenüber gestellt.

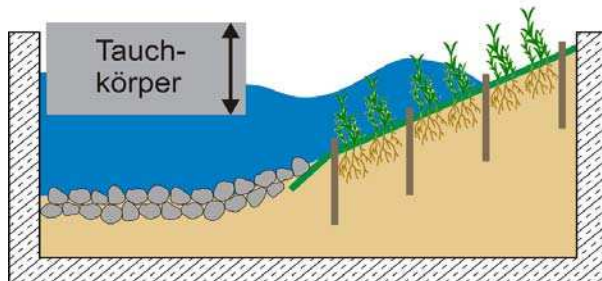


Bild 1: Systemskizze des Wellenbeckens mit einer technisch-biologischen Ufersicherung

3 Ergebnisse

Die Böschung im Wellenbecken wurde parallel zur Böschungsfällinie durch eine Trennwand aufgeteilt und jeweils ein kiesiger und ein sandiger Boden eingebaut. Auf den Böden wurden Weidenspreitlagen aus Korb- und Purpurweiden gepflanzt. Die Weidenspreitlagen haben sich gut entwickelt. Es wurden Absunkereignisse mit Absunktiefen von 7 - 48 cm und Absunkzeiten von 2 - 14 s auf die Spreitlagen aufgebracht. Augenscheinlich haben die Spreitlagen diesen hydraulischen Belastungen standgehalten. Messungen der Veränderung der Böschungseignung mit Ketteninklinometern und selbst entwickelten Neigungsmessketten ergaben vernachlässigbar geringe Erosionserscheinungen und vernachlässigbare Böschungsinstabilitäten innerhalb der gesamten Versuchsreihe. Messungen des Bodenanteils, der durch die hydraulische Belastung im Wasser erodiert, ergaben einen Schwebstoffanteil an Boden je Versuch von weit unter 1 g pro 1 Liter Wasser. Es waren somit keine Erosionserscheinungen messbar.

Die aufgenommenen Porenwasserüberdrücke zeigten zwei Phänomene:

Schon in der Übererdung der Spreitlage bildet sich ein Porenwasserüberdruck aus. Daraus folgt, dass das Flächengewicht der Übererdung nicht als zusätzlicher Widerstand angesetzt werden kann.

Die Hypothese, dass auf Grund zunehmender Durchwurzelung die Durchlässigkeit des Bodens zunimmt und dies zu einer Dämpfung des Porenwasserüberdrucks mit zunehmender Anwuchsdauer führt, wurde nicht bestätigt. In kritischen Tiefen ist mit zunehmender Anwuchsdauer der gemessene Porenwasserüberdruck zunächst angestiegen und nach weiteren Wochen zurückgegangen.

Mit den aufgetretenen Porenwasserüberdrücken und unter einem realistischen Ansatz einer Durchwurzelungskohäsion konnte die lokale Standsicherheit gegenüber Abgleiten rechnerisch nachgewiesen werden, was den Ergebnissen des Experiments entspricht.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012:

- Durchführung weiterer Modellversuche im Wellenbecken
- Auswertung und Vergleich der Messergebnisse mit ersten Messergebnissen an der Versuchsstrecke am Rhein
- Durchführung von Scherfestigkeitsuntersuchungen
- Vertiefung der theoretischen Betrachtungen

2013:

- Auswertung und Interpretation der Modellversuche
- Entwicklung von Standsicherheitsnachweisen für technisch-biologische Ufersicherungen
- Ggf. Formulierung von weiterem Entwicklungsbedarf
- Erstellung eines Abschlussberichtes



Bild 2: Weidenspreitlage im eingestauten Wellenbecken nach 5 Monaten Anwuchsdauer

5 Literatur

- Fleischer, P. et al. (2006, 2008): Untersuchungen zu alternativen, technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen. Teil 1 und 2 (F&E Projekt). Bundesanstalt für Gewässerkunde, Bundesanstalt für Wasserbau
- Gerstgraser, C. (2000): Ingenieurbio-logische Bauweisen an Fließgewässern- Grundlagen zu Bau, Belastbarkeit und Wirkungsweisen. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag
- Rauch, H.-P. (2006): Hydraulischer Einfluss von Gehölzstrukturen am Beispiel einer ingenieurbio-logischen Versuchsstrecke am Wienfluss. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien. Band 63. Guthmann-Peterson

6 Veröffentlichungen

- Eisenmann, J. (2010): Modellversuche zur Belastbarkeit technisch-biologischer Ufersicherungen in einem Wellenbecken. BAW -Kolloquium „Alternative technisch-biologische Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen, Hannover.
- Eisenmann, J., Fleischer, P., Soyeaux, R. (2010): Uferschutz und Ökologie – Untersuchungen zu Möglichkeiten und Grenzen naturnaher Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen. Dresdner Wasserbaukolloquium „Wasserbau und Umwelt – Anforderungen, Methoden, Lösungen“, Dresden.

Erosion von Dichtungstonen und bindigen Böden unter Strömungsbelastung

Netzplan-Nr.: A39520470003

Projektleiter: Dipl.-Ing. (FH) A. Schneider, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz

E-Mail: achim.schneider@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

Mit Einführung der überarbeiteten ZTV-W, LB 210 im Jahr 2006 wurden gleichzeitig die Richtlinie zur Prüfung mineralischer Weichdichtungen im Verkehrswasserbau (RPW) zur Prüfung der Eignung von Erdstoffen zur Verwendung als Dichtungsbaustoff verankert. Zum Nachweis der Erosionsstabilität sind in dieser Richtlinie der Zerfallsversuch nach Endell und der Pin-Hole-Test aufgeführt. Für beide Verfahren gelten bisher keine wissenschaftlich abgesicherten Ausschlusskriterien. Ähnlich gelagerte Anwendungsfälle bzw. Materialuntersuchungen, z.B. aus dem Deponiebau liefern aufgrund der stark unterschiedlichen Einbausituation (Unter-Wasser-Einbau, Strömungsbelastung durch Schifffahrt bzw. auf Gewässersohlen) keine hinreichend übertragbaren Bewertungskriterien. Eindeutige und reproduzierbare Kriterien sind jedoch besonders im Hinblick auf länderübergreifende Ausschreibungsverfahren unerlässlich, um bei der Vergabe entsprechender Baumaßnahmen nachvollziehbare und gerichtlich nicht angreifbare Kriterien zur Verfügung zu stellen.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Eine Prognose zum Erosionsverhalten bindiger Böden ist bei vielen geotechnischen und hydraulischen Fragestellungen eine notwendige Eingangsgröße zur Beurteilung der Auswirkungen der hydraulischen Belastungen auf den hiervon betroffenen Boden. Ebenso ist die labortechnische d.h. versuchstechnische Abbildung dieses Verhaltens eine nicht hinreichend gelöste Fragestellung. Aus der Literatur sind einige Ansätze wie der Zerfallsversuch nach Endell und auch der Pin-Hole-Test nach British Standards bekannt. Beide Versuche sind nicht genormt. Auch ist über die versuchsspezifischen Anwendungsgrenzen im Hinblick auf die zu untersuchenden Böden und bezüglich der Grenzwerte der möglichen hydraulischer Belastungen wenig bekannt. Eventuell wird es erforderlich sein, neue und besser geeignete Tests und Untersuchungsverfahren zu entwickeln.

1.2 Bedeutung für die WSV

Neben der Notwendigkeit eindeutiger Materialparameter für eine konfliktfreie Vergabepraxis ist die Frage nach der Erosionsstabilität von Dichtungsbaustoffen auch vor den Hintergrund immer enger werdender Haushaltsmittel beim Bau neuer bzw. bei der Unterhaltung vorhandener Wasserstraßen zu betrachten. Zukünftig kann es erforderlich werden, vorhandene Kanalstrecken mit höheren Schiffsgrößen bzw. Abladetiefen als ursprünglich geplant zu beanspruchen. Es ist zu befürchten, dass die dabei auftretenden höheren Strömungsbelastungen in bisher ungedichteten Kanalstrecken abhängig von der Erosionsneigung des ungeschützten bindigen Sohlmaterials bzw. der Tondichtungen zu Schäden führen. Um dieses Schadenspotenzial besser einschätzen zu können, sind entsprechende Kenntnisse und Untersuchungen zur Erosionsneigung der im Sohlbereich anstehenden Böden unerlässlich.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen ist die Definition einfacher Versuchsmethoden zur Beschreibung des Erosionsverhaltens bindiger Böden, mit denen es möglich sein soll, reproduzierbare Parameter zu ermitteln.

2 Untersuchungsmethoden

Zur Verifizierung und zur Feststellung der Reproduzierbarkeit der bisher verwendeten Versuche ist vorgesehen, im geotechnischen Labor der BAW Karlsruhe mehrere unterschiedlich plastische Böden, vordergründig Dichtungstone, hinsichtlich Zerfall und Erosionsstabilität nach den bisherigen Testverfahren der RPW zu untersuchen. Hierzu sind Reihenuntersuchungen zur Optimierung der Versuchsparameter wie z.B. Einwirkdauer, Strömungsgeschwindigkeit, Probengröße etc. erforderlich. Sollte sich keine oder eine nicht ausreichende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse abzeichnen, so

werden die Untersuchungen auf die Ermittlung des Einflusses weiterer möglicher Parameter (Mineralbestand etc.) ausgedehnt. Werden nach einer eventuellen Modifikation d.h. Verbesserung der Untersuchungsweise auch weiterhin keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt, folgt eine Erweiterung der Arbeiten auf die Entwicklung neuer Testverfahren. In diesem Zusammenhang wird beabsichtigt, das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart mit entsprechenden Überströmversuchen zu beauftragen, da dort bereits aus vorhergehenden Studien eine entsprechende Versuchsanlage vorhanden ist.

3 Ergebnisse

In 2011 wurden erste Überströmungsversuche am Institut für Wasserbau in Stuttgart durchgeführt. Ein entsprechender Bericht hierzu steht noch aus. In der BAW wurden erste Vorversuche zum Zerfallsverhalten und zur Materialveränderung bzw. zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durchgeführt. Ergänzend wurde zahlreiche Literatur zum Zerfall von Tonmaterial und zum Verhalten bei Durchströmung (Pin-Hole-Versuch) recherchiert. Eine Bewertung der Quellen steht noch aus.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2011:

- Literaturrecherche zur Thematik Zerfallsversuch und Pin-Hole-Test
- Überlegungen zu alternativen oder auch ergänzenden Testverfahren
- Festlegung eines Versuchsprogramms
- Durchführung der entsprechenden Laborversuche

2012:

- Durchführung weiterer Laborversuche
- Auswertung und Vergleich der Messergebnisse
- Eventuell Erweiterung des Versuchsprogramms auf andere Testverfahren

2013:

- Abschluss der Laboruntersuchungen
- Ggf. Formulierung von weiterem Entwicklungsbedarf
- Erstellung eines Abschlussberichtes

Zustandsentwicklung von Deckwerken

Netzplan-Nr.: A39520470004

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

E-Mail: jan.kayser@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Zur Förderung der Binnenschifffahrt in Deutschland ist es sinnvoll, eine weitestgehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes auch mit großen Binnenschiffen (GMS über 10 m Breite) zu ermöglichen. Dieses Ziel ist mit dem Ausbau vorhandener Wasserstraßen nach den „Richtlinien für Regelquerschnitte an Binnenschifffahrtskanälen“ des BMVBS mit Vertiefung, Verbreiterung und dementsprechend auch neuen, ausreichend bemessenen Böschungs- und Sohlensicherungen realisierbar. Dabei wird ein guter Standard für sichere, wirtschaftliche und unterhaltungsarme Deckwerke sowie hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Gewässerquerschnitt und Schiffsgröße erreicht.

Aus ökologischen oder wirtschaftlichen Gründen ist dieser umfängliche Ausbau der Wasserstraßen jedoch nicht in allen Fällen sinnvoll oder durchsetzbar. Um trotzdem eine möglichst weit gehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes für große Binnenschiffe zu erhalten, wird zunehmend eine Absenkung des technischen Standards (Standardabsenkung) in Betracht gezogen. Diese Standardabsenkung führt zu verhältnismäßig kleinen Querschnitten (Gewässertiefen und/oder Breite), zu Einschränkungen von Fahrsituationen (Richtungsverkehr, Überholverbote) und zu – bezogen auf die gängigen Bemessungsregeln - unterdimensionierten Deckwerken. Die Standardabsenkung kann zur Überlastung der Wasserstraßen führen, was sich wiederum negativ auf die Sicherheit und Langzeitstabilität der Ufersicherungen, die größtenteils als Deckwerke ausgeführt werden, auswirkt. Derzeit gibt es kein Verfahren, mit dem die Auswirkungen einer Überlastung von Deckwerken auf deren Zustandsentwicklung bzw. den erforderlichen Unterhaltungsaufwand quantifizierbar wäre.

Ziel des Forschungsvorhabens ist es ein Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe die Auswirkungen einer Standardabsenkung in der Wasserstraße auf die Standsicherheit und Langzeitbeständigkeit von Böschungs- und Sohlensicherungen projektspezifisch prognostiziert werden um dann über die technische und wirtschaftliche Notwendigkeit von Ausbau, Teilausbau oder Ertüchtigung von Ufersicherungen oder auch über verkehrliche Einschränkungen fundiert entscheiden zu können.

Deckwerke an Binnenwasserstraßen werden nach den „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen (GBB)“ bemessen. Auf der Basis des GBB wurden die Regelbauweisen (MAR) entwickelt, die unter bestimmten Randbedingungen als standardisierte Bauweisen verwendbar sind. Die Standardbauweisen stellen einen ausreichenden Standard hinsichtlich der Belastbarkeit und der Langzeitbeständigkeit bei geringem Unterhaltungsaufwand dar. Wird dieser Standard abgesenkt, ist mit erhöhtem Unterhaltungsaufwand oder mit Uferabbrüchen zu rechnen. Hier ist eine differenziertere Betrachtung der technischen und wirtschaftlichen Folgen einer Standardabsenkung notwendig.

Die Kernfrage ist, wie sich unterbemessene Ufersicherungen mittel- und langfristig entwickeln werden. Bekannt ist derzeit nur, dass überlastete (unterbemessene) Deckwerke eine bis zu 8-fach höheren Unterhaltungsaufwand als normal belastete (standardgemäß bemessene) Deckwerke erfordern. Als wissenschaftliche Grundlage zur Bewertung der Belastung eignen sich die im GBB beschriebenen Bemessungsregeln.

1.2 Bedeutung für die WSV

Im Anlagevermögen der WSV sind ca. 20 Mrd. € in Ufersicherungen, ein großer Teil davon in Deckwerken enthalten. Ufersicherungen haben in Teilbereichen eine große Sicherheitsrelevanz.

Eine Standardabsenkung in der Ausführung von Ufersicherungen birgt daher große wirtschaftliche und technische Risiken. Die Abschätzung dieser Risiken ist eine wichtige Grundlage für Entscheidungen

hinsichtlich zulässiger Schiffsverkehre und/oder Investitionen in das Gewässerbett und dessen Sicherung.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen ist die Entwicklung eines Verfahrens zur differenzierten Prognose der Zustands bzw. des Unterhaltungsaufwands für Deckwerke unter Berücksichtigung projektspezifischer Randbedingungen hinsichtlich der vorhandenen Ufersicherung und der hydraulischen Belastung. Die hydraulische Belastung wird wiederum maßgeblich durch die Geometrie des Gewässers und den Schiffsverkehr (Schiffsflotte, Fahrverhalten, Frequenz) bestimmt.

2 Untersuchungsmethoden

Für die Prognose von Bauwerkszuständen gibt es bereits verschiedene Verfahren. Für Deckwerke erscheint es sinnvoll, sich an Systemen der Fahrbahnunterhaltung für Straßen zu orientieren, die auf statistischen Verfahren basieren [Fastrich, A., Girmscheid, G., 2010]. In Vorstudien hat sich gezeigt, dass hier Prognoseverfahren auf der Grundlage von Markov – Ketten unter Berücksichtigung der zufällig verteilten Einflussgrößen sinnvoll sind.

Die hierfür erforderlichen Basisdaten sollen über die Bemessung nach GBB mit der Software GBBSOFT mit Monte-Carlo-Simulationen ermittelt werden. Die hydraulischen Belastungen, die Schiffsflotten und das Fahrverhalten der Schiffe sind hierfür statistisch zu beschreiben. Dies erfolgt zunächst beispielhaft an bereits vorhandenen Messungen an Wasserstraßen. Die dabei gewonnenen statistischen Modelle sollen möglichst allgemein formuliert werden, um auf zukünftige Projekte übertragbar zu sein.

Möglich ist auch die Beschaffung der Basisdaten aus einer Befragung von Experten aus der WSV und der BAW zu ihren Erfahrungen hinsichtlich der Entwicklung des Zustandes von Deckwerken (Delphi-Methode). Das Ergebnis der Befragung sollen Entwicklungskurven von Deckwerken unter verschiedenen Randbedingungen sein.

Eine erste Validierung dieser Basisdaten und des darauf basierenden Prognosemodells ist auf der Grundlage von Erfahrungen aus dem bereits seit längerer Zeit laufenden Forschungsvorhaben „Bestandsaufnahme Deckwerke“ möglich.

Durch gezielte Messungen insbesondere in der Natur sollen Lücken in den Basisdaten, die sich im Zuge der Modellerstellung zeigen, geschlossen und damit das Modell weiter entwickelt werden. Als Abschluss kann es sinnvoll sein, das Verfahren in eine Software zur projektspezifischen Prognose der Zustandsentwicklung von Deckwerken umzusetzen und so in der WSV-praxis eine gute Anwendbarkeit und Akzeptanz der Ergebnisse zu erreichen.

3 Ergebnisse

Das Vorhaben wurde im Oktober 2011 begonnen, daher liegen noch keine Ergebnisse vor.

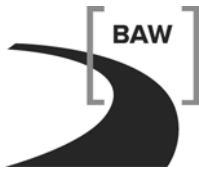
4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2011:

- Auswertung vorhandener Daten zur statistischen Modellbildung
- Monte-Carlo-Simulation mit vorhandenen Daten

2012:

- Monte-Carlo-Simulation mit vorhandenen Daten (Entwicklung einer Software auf Basis VBA-Excel zur Erstellung und Berechnung von simulierten Bemessungsfällen in GBBSOFT, Durchführung der Simulationen)
- Modell zur Zustandsentwicklung von Deckwerken, voraussichtlich mit Markov-Ketten
- Ggf. Expertenbefragung zur Erstellung von Entwicklungskurven für Deckwerke
- Messungen zur Zustandentwicklung von Deckwerken an Wasserstraßenabschnitten



2013 und 2014:

- Entwicklung eines Modells ggf. mit softwaretechnischer Lösung zur Prognose des Zustands von Deckwerken, gekoppelt mit dem erforderlichen Unterhaltungsaufwand

5 Literatur

Fastrich, A., Girmscheid, G., 2010: Optimierungsmodell – Probabilistische Optimierung des Straßenunterhaltung mittels Markov-Ketten und Monte-Carlo-Simulation, Bauingenieur, Band 85, S. 471 - 481

Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen

Netzplan-Nr.: A39530170003

Projektleiter: Dr.-Ing. T. Wenka, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Projektgruppe FTM

E-Mail: thomas.wenka@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Morphologische Betrachtungen sind aufgrund der ausgedehnten Beobachtungszeiträume überwiegend großräumig und langfristig angelegt. Die Analyse der sohlernen und somit bettbildenden Prozesse bedarf infolge des intensiven Zusammenspiels geometrischer, granulometrischer und strömungsmechanischer Effekte einer zeitlich und räumlich hoch auflösenden Betrachtungsweise BAW (2007). Obwohl die mikro- bis mesoskaligen Strömungsprozesse aufgrund deren Turbulenz chaotischer, d.h. stochastischer Natur sind, kamen bisher in der Strömungsmodellierung vorrangig deterministische Methoden zum Einsatz mit dem Ziel, die integralen Prozesse zumindest anhand statistisch mittlerer Werte gut abbilden zu können.

Dreidimensionale Effekte der Strömung spielen im Nahbereich von Bauwerken und baulichen Maßnahmen wie auch in Gerinnekrümmungen entscheidende Rollen, die sich im mesoskaligen Bereich auch auf die bettbildenden Prozesse auswirken (Blanckaert & de Vriend, 2003). Neben der Untersuchung des Potentials der dreidimensionalen Strömungsmodellierung, morphologische Prozesse besser beschreiben zu können, stehen die Untersuchung, Implementierung und Anwendung von Schubspannungsansätzen im Vordergrund, die zusätzlich die vertikale Geschwindigkeitskomponente berücksichtigen.

Der als Bewegungsbeginn der Sohle bezeichnete Grenzzustand ist bei der numerischen Modellierung der Morphodynamik in Flüssen ein für die Prognose des Sedimenttransports und die daran gekoppelte Morphogenese der Stromsohle maßgeblicher Parameter. Von der „Belastungsseite“ (mechanical load), d. h. von der Strömungsseite kommend, ist es die transportwirksame Sohlschubspannung, die es in Abhängigkeit des gewählten Verfahrens- bzw. Modellansatzes zu erfassen gilt. Von der „Widerstandsseite“ (bed resistance), d.h. von der Flusssohle kommend, sind es die Oberflächen- (Korndurchmesser) bzw. Formrauheit (Unebenheiten, Transportkörper) und die Beschaffenheit der Kornmatrix (Lagerungseigenschaften), die in Bezug auf den Bewegungsbeginn eine entscheidende Rolle spielen (Koll, 2002; LWI, 2008).

Da der Bewegungsbeginn bekanntlich schon in Laboruntersuchungen eine sehr große Streubreite aufweist, ist seine modelltechnische Abbildung, die bislang auf der Wahl möglichst repräsentativer Schwellenwerte oder Formeln beruht, mit einer entsprechenden Unschärfe gekoppelt, die sich wiederum maßgeblich auf die quantitative Erfassung von Sedimenttransport und Bettbildung in Binnenflüssen und -wasserstraßen auswirkt. Zur Erfassung der Extremwerte und Anisotropie der den Bewegungsbeginn beeinflussenden Wirbelstrukturen wäre der Einsatz von LES (Large Eddy Simulation) angebracht, der allerdings für praktische Strömungssituationen als noch zu aufwendig angesehen wird. Mittels „upscaling“ der aus LES gewonnenen Informationen ist jedoch eine Anwendbarkeit auf die Problemstellungen aus der Praxis anzustreben.

1.2 Bedeutung für die WSV

Den durch Bau-, Regelungs-, Instandhaltungs- und Geschiebemanagementmaßnahmen an Bundeswasserstraßen induzierten „morphodynamischen Nachlauf“ möglichst exakt abschätzen und detaillierter planen zu können, ist eine wesentliche Aufgabe der Abteilung Wasserbau im Binnenbereich bei der Beratung der planenden und ausführenden Instanzen der WSV.

Hierzu bietet sich in der BAW der Einsatz numerischer Feststofftransportmodelle an. Solche Modelle liefern Prognosen zur Entwicklung der Sohle vor und nach einem baulichen Eingriff und können sowohl zum Nachweis der großräumigen und langfristigen Wirkung der Maßnahmen (1D-/2D-Modelle) wie

auch zur Optimierung der Vorgehensweisen und Abläufe im Nahbereich des Eingriffs (2D-/3D-Modelle) eingesetzt werden.

1.3 Untersuchungsziel

Als Ziel der Untersuchungen sollen dreidimensionale Strömungseffekte und die damit verknüpften Transportphänomene in den numerischen 2D- und 3D-Modellen, die auf der TELEMAC-SISYPHE Programmumgebung beruhen, adäquat erfasst werden. Ferner sollen die bisher in den numerischen Verfahren verwendeten Ansätze für den Bewegungsbeginn anhand von aktuellen Methoden, die ggfs. auf deterministischen, stochastischen oder gemischten Ansätzen beruhen, verfeinert werden. Durch deren Implementierung in die numerischen Modelle der BAW sollen die Planung von Bau- und Unterhaltungsmaßnahmen und die Vorhersage von morphodynamischen Entwicklungstendenzen in Bundeswasserstraßen künftig zuverlässiger und genauer werden BAW (2010).

2 Untersuchungsmethoden

Da die Untersuchungen primär der Weiterentwicklung der numerischen Methoden der BAW im Bereich des Flussbaus dienen, steht das Telemac-Sisyphé-System (EDF) im Vordergrund.

Da die softwaretechnische Umsetzung einer Validierung bedarf, sind vergleichende Untersuchungen in der Systemrinne der BAW erforderlich. Sofern qualitativ angemessene Naturdaten zur Verfügung stehen, sind diese ebenfalls zur Validierung der neuen Ansätze heranzuziehen. Welche aktuellen Ansätze derzeit im Bereich des Flussbaus eingesetzt werden und inwiefern sich alternative Methoden auf die Problemstellungen der BAW anwenden lassen, wurde in einer Literaturstudie des Instituts für Wasser und Umwelt der TU München „Alternative Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports in Fließgewässern“ (TUM, 2011) untersucht.

Die Aufgabenpakete sind inhaltlich mit dem Fachkonzept der PG-FTM abgestimmt, so dass neue Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt unmittelbar Eingang in die Projektarbeit finden. Die fachliche Integration der bestehenden Forschungsk Kooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung (IWG) des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) in das geplante FuE-Vorhaben ist vorgesehen, um eine möglichst enge Verknüpfung der einzelnen Forschungsarbeiten zu ermöglichen.

3 Ergebnisse

Im Rahmen von mehrdimensionalen numerischen Betrachtungen anhand von Labormodellen bzw. Naturstrecken sollte eine Beurteilung der Möglichkeiten und Grenzen einer 2D-tiefengemittelten im Gegensatz zu einer dreidimensionalen Erfassung der Strömung als Basis morphologischer Modellierungen erfolgen. Neben der Modellierung eines Laborgerinnes (Modell „Wormleaton“) wurde dabei auch die Naturstrecke „Mühlhamer Schleife“ an der Donau analysiert, um die Übertragbarkeit der Ergebnisse und Erkenntnisse auf natürliche Krümmungsradien und Breiten-Tiefen-Verhältnisse zu überprüfen.

Es zeigte sich, dass die Dimensionalität der Strömungserfassung einen signifikanten Einfluss - sowohl zeitlich als auch räumlich - auf die morphologischen Ergebnisse haben kann. Im Gegensatz zur zweidimensionalen tiefengemittelten Modellierung (mit parametrisiertem Sekundärströmungsansatz) werden im 3D-HN-Modell die für Transportvorgänge maßgebenden sohnahen Geschwindigkeiten direkt erfasst und die Entstehung sowie der Zerfall auftretender Sekundärströmungen abgebildet. So führt im betrachteten Modellversuch von Wormleaton et al. (2005) eine dreidimensionale Erfassung der Strömungsgrößen insbesondere im Bereich der An- und Nachlaufstrecke der Gerinnekrümmungen zu einer verbesserten Übereinstimmung mit den vorhandenen morphologischen Messdaten. Diese Erkenntnisse konnten auch bei der Modellierung der Naturstrecke „Mühlhamer Schleife“ qualitativ bestätigt werden (IWG, 2011a, b).

Laborversuche der BAW an einer geraden Rinne mit hoch aufgelösten Geschwindigkeitsmessungen bis nahe an die Gerinnesohle wurden zum Verfahrenvergleich mit unterschiedlichen dreidimensionalen HN-Verfahren (TELEMAC-3D; Flow3D; CFX; OpenFoam; Delft3D) numerisch nachgerechnet. Hierbei ergab sich bzgl. der sich einstellenden Geschwindigkeitsprofile eine qualitativ gute Übereinstim-

mung der numerischen Ergebnisse untereinander sowie mit den vorhandenen Labormessdaten. Das Verfahren TELEMAC-3D zeigte jedoch eine deutliche Abhängigkeit von den unterschiedlichen Turbulenzmodellierungsansätzen. Inwiefern die in der neuen Programmversion (v6p1) umgesetzten Programmänderungen hinsichtlich der Turbulenzmodellierung mittels k - ϵ -Modells zu einer Verbesserung der Ergebnisse führen, muss noch abschließend getestet werden (IWG, 2011b).

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012 – 2013:

1. Erfassung des Sekundärströmungseinflusses und der Sohlschubspannung in 2D- und 3D-FT-Modellen (s. Kooperationsvereinbarung zwischen IWG und BAW)
 - Implementierung eines Ansatzes zur verbesserten Erfassung des Einflusses der Sekundärströmung auf den Geschiebetransport im 2D-tiefengemittelten Modell im Bereich der Vor- und Nachlaufbereiche von Gerinnekrümmungen („loading-law“).
 - Untersuchungen der sog. „TKE-Methode“, einem alternativen Ansatz zur Berücksichtigung der Sohlschubspannungen.
 - Ergänzende und vergleichende 3D-Modellierungen zu den 2D-tiefengemittelten Simulationen im Mäanderabschnitt des 2D-FTM „Mittlerer Niederrhein“.
2. Alternative Geschiebetransportansätze zur numerischen Modellierung des Bewegungsbeginns und des Sedimenttransports
 - Auswertung der Literaturstudie „Alternative Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports in Fließgewässern“ der TU München.
 - Implementierung und detaillierte Untersuchung eines alternativen Geschiebetransportansatzes in mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen.

5 Literatur

- BAW (2010): Fachkonzept der Projektgruppe Mehrdimensionale Feststofftransportmodellierung, Vers. 1.0
- BAW (2007): Abschlussbericht zum FuE-Projekt 8140, Stabilität der Sohle von Wasserstraßen
- Blanckaert, K. & de Vriend, H.J. (2003): Nonlinear modelling of mean flow redistribution in curved open channels. *Water Resources Research*, 39 (12), pp. 1375-1388
- IWG (2011a): 1. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der Telemac-Sisyph Programmumgebung (01. -12.2010). Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, März 2011.
- IWG (2011b): 2. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der Telemac-Sisyph Programmumgebung (04. -12.2011). Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Dez. 2011.
- Koll, K. (2002): Feststofftransport und Geschwindigkeitsverteilung in Raugerinnen. Diss., Institut für Wasserwirtschaft und Kulturtechnik, Universität Karlsruhe
- LWI (2008): Literaturrecherche zum Geschiebetransport und zur Morphologie alluvialer Gewässer unter besonderer Berücksichtigung von Transportkörpern. Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig
- TUM (2011): Literaturstudie „Alternative Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports in Fließgewässern“. Institut für Wasser und Umwelt, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München
- Wormleaton, P.R.; Hey, R.D.; Sellin, R.H.J.; Bryant, T.; Loveless, J.; Catmur, S.E. (2005): Behaviour of Meandering Overbank Channels with Graded Sand Beds. *J. Hydr. Eng.*, Vol. 131, No. 8, pp. 665 – 681.

Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen

Netzplan-Nr.: A39550270141

Projektleiter: Dr.-Ing. K. Uliczka, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,
Referat Ästuarsysteme I (K2)

E-Mail: klemens.uliczka@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, berät die für den Bereich der Küstenregionen zuständigen Wasser- und Schifffahrtsämter (WSÄ) der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) u.a. hinsichtlich Funktion und Stabilität von Strombauwerken an den Seeschiffahrtsstraßen (SeeSchStr) der Tideästuare, der Ostsee sowie dem Nord-Ostseekanal.

Schadensfälle an Leitwerken und Buhnen sowie Deckwerken an den Seeschiffahrtsstraßen aufgrund schiffserzeugter Belastungen wurden in der letzten Dekade verstärkt in der Außenweser sowie in der Untere Elbe festgestellt. Vom WSA Bremerhaven wurden diesbezüglich Messungen zur Größenordnung der schiffserzeugten Belastungen der Leitdämme und Buhnen in der Außenweser beauftragt, die von der BAW analysiert und hinsichtlich einer Bemessung der Deckschicht bearbeitet wurden. In dem abschließenden Gutachten stellte die BAW fest, dass nach Stand von Technik und Wissenschaft für die Bemessung der Leitdämme und Buhnen keine bekannten Ansätze für die erfassten instationären, schiffserzeugten Wellenbelastungen vorliegen. Für eine Abschätzung der hydrodynamischen Belastung als Basis für die Ermittlung der erforderlichen Steingrößen / -gewichte konnten nur vorhandene theoretische, fachlich nicht exakt zutreffende und nur bedingt gültige Ansätze verwendet werden (BAW, 2010).

Hoch instationäre und turbulente hydrodynamische - zudem in Tideästuaren wasserstandsabhängige - schiffserzeugte Belastungen, wie beispielhaft in Bild 1 für eine Seeschiffahrtsstraße dargestellt, führen zu komplexen Untersuchungsaufgaben mit einer hohen Zahl von zu erfassenden und physikalisch zu beschreibenden hydrodynamischen Parametern, verteilt über verschiedene zu bemessende Abschnitte von Leitdämmen und Buhnen einschließlich deren Anbindung an die Ufersicherungen.



Bild 1: Schiffserzeugte Absenkung und Primärwellenbelastung einer Buhne in einer Seeschiffahrtsstraße

Durch die Kooperation mit universitären Einrichtungen werden wichtige Impulse für - über dieses Projekt hinausgehende – weitere Grundlagenforschungen erwartet, so dass dadurch ein zusätzlicher Mehrwert auf diesem WSV-relevanten Forschungsgebiet durch ebendiese Universitätsinstitute geschaffen wird.

1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund der weiterhin zunehmenden Größenentwicklung der Containerschifffahrt mit der Inbetriebnahme von 14.000 TEU-Containerschiffen in 2010 und der Beauftragung von 18.000 TEU-Containerschiffen mit Längen von ca. 400 m und Breiten von 56 m (erste Auslieferung 2013) erhält die nachhaltige Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken und Ufersicherungen an den Seeschiffahrtsstraßen der Tideästuare bei der Kenntnis der bemessungsrelevanten Parameter der schiffserzeugten Belastungen eine wachsende Bedeutung. Die Ergebnisse der Untersuchungen werden in Form von Bemessungshinweisen für Vorhabensträger der WSV an Seeschiffahrtsstraßen erarbeitet und von der BAW veröffentlicht. Die Dringlichkeit des FuE-Projekts ergibt sich aus der akut erforderlichen, fachgerechten und nachhaltigen Sanierung der Schadensfälle (z.B. Außenweser Langlütjennord und Unterebbe Juellssand).

1.3 Untersuchungsziel

Das vorgesehene FuE-Projekt hat zum Ziel, fundierte Unterlagen für den Bereich der Seeschiffahrtsstraßen der WSV an Nord- und Ostsee zu erarbeiten, die eine fachlich abgesicherte und nachhaltige Bemessung auf die langperiodischen, schiffserzeugten Lastfälle durch Wellen und Strömung bzw. Überströmen ermöglichen. Dazu sind im Wesentlichen folgende Untersuchungsschwerpunkte zielführend:

- Grundsätzliche Erfassung der kurz- und langperiodischen schiffserzeugten physikalischen Prozesse im Nahbereich von Leitdämmen und Buhnen.
- Ableitung analytischer Ansätze zur nachhaltigen Bemessung von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen mit Bestimmung bemessungsrelevanter Parameter anhand von Messdaten.
- Aufbereitung abgesicherter Validierungsdaten für numerische Verfahren u.a. aus fachübergreifenden Forschungsgebieten der Geotechnik.
- Anwendung / ggf. Entwicklung hydrodynamisch-numerischer Verfahren zur schiffserzeugten Belastungssituationen von Deckschichten an Strombauwerken.
- Vergleichende Bewertung probabilistischer Bemessungsverfahren zum Einsatz in der WSV.

2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Projekts sind umfangreiche methodenübergreifende Untersuchungen an Seeschiffahrtsstraßen zur langperiodischen schiffserzeugten Belastungen im Nahbereich von Leitdämmen und Buhnen vorgesehen:

- Erarbeitung und/oder Prüfen von vorhandenen empirisch-analytischen Ansätzen hinsichtlich der Anwendung für eine nachhaltige Bemessung.
- Messungen in der Natur an exponiert liegenden Strombauwerken ausgewählter Seeschiffahrtsstraßen über repräsentative Zeiträume.
- Großmaßstäbliche Untersuchungen verschiedener einzelner physikalischer Prozesse der langperiodischen schiffserzeugten Lastfälle unter kontrollierten Bedingungen.
- Kleinmaßstäbliche, dreidimensionale Modellversuche zur Wirkung der Energiedissipation langperiodischer Wellen z.B. bei hinterströmten Buhnen im Schiffswellenbecken der BAW.
- Hydrodynamisch-numerische Simulation der relevanten Prozesse bei schiffserzeugten, vorübergehenden Bemessungssituationen.
- Anwendung der erarbeiteten Bemessungsregeln für in der Praxis erprobte Strombauprofile an Seeschiffahrtsstraßen.
- Bearbeitung eines probabilistischen Bemessungsansatzes als weitere FuE-Komponente parallel zur deterministischen Bemessung.
- Analyse von Monitoring-Daten hinsichtlich der Nachhaltigkeit neuer Strombauwerke vor Ort.

Des Weiteren sind hinsichtlich einer ganzheitlichen Betrachtung der Aufgabenstellung enge projektübergreifende Kontakte mit dem FuE-Projekt A39550170270 der BAW aus dem Fachgebiet Geotechnik vorgesehen.

3 Ergebnisse

Die im Arbeitspaket 1 (AP1) begonnene Schadensanalyse ging deutlich über die lokale Betrachtung im Gutachten der BAW (BAW, 2010) hinaus, indem neben schon bekannten Schadensfällen alle Küstenämter der WSV sowie auch die zuständige Abteilung „AM Ufer- und HWS-Anlagen“ der Hamburg Port Authority (HPA) eingebunden wurden (HPA, 2011).

Die auffälligsten und schwersten Schäden, die nachweisbar durch das schiffserzeugte, langperiodische Primärwellensystem verursacht wurden, traten im Zuständigkeitsbereich des WSA HH im Abschnitt Juelssand (Elbe-km 651,2 bis 653,2) auf. Da die Uferzone seit einigen Jahren hinsichtlich naturnaher Umgestaltung überplant wurde, erfolgte keine Beseitigung der Anfangsschäden, so dass die Schadensentwicklung über mehrere Jahre verfolgt und dokumentiert werden konnte (u.a. durch das WSA HH und die BAW). Die langzeitliche Entwicklung der Schäden an den Buhnenwurzeln durch das langperiodische Primärwellensystem von 2003 bis 2009 wird anhand von Bild 2 deutlich.

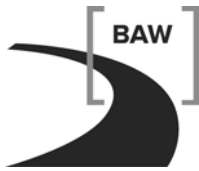


Bild 2: Zerstörte Buhnenwurzeln an der Unterelbe bei Juelssand (Foto: BAW, 2009)

Recherchen der BAW (BAW, 2010) machten deutlich, dass auf dem Gebiet der instationären, hydrodynamischen Belastung von Leitdämmen und Buhnen durch verschiedene Lastfälle aus schiffserzeugter Belastung noch erheblicher Forschungsbedarf z.B. hinsichtlich der anzusetzenden Zulaufgeschwindigkeit beim Überströmen durch eine Primärwelle (vergl. Bild 1) besteht.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Nach einer ersten noch nicht abgeschlossenen umfangreichen Schadensanalyse (Arbeitspaket AP1) in 2011 sind neben weitergehenden Prozess- und Wissensstandsanalysen (AP2) für das nächste Jahr die Parametrisierung von gemessenen Schiffswellen in Modell und Natur als AP3 beauftragt. Die bisher geplanten 11 Arbeitspakete werden voraussichtlich einem Bearbeitungszeitraum von rund 5 bis 6 Jahren in Kooperation mit den Küstenämtern der WSV sowie kompetenten Universitätsinstituten und wissenschaftlich orientierten Ingenieurbüros in Anspruch nehmen. Zudem wird erwartet, dass aufgrund der Initiierung des Forschungsprojekts durch die BAW weitergehende Grundlagenforschungen von den



beteiligten wissenschaftlichen Institutionen gesehen und in Rahmen einer Verbundforschung aufgegriffen werden.

5 Literatur

BAW; Bemessung der Strombauwerke in der Außenweser unter Berücksichtigung von Schiffswellenbelastungen, BAW-Nr. A39550210120, Hamburg 2010

HPA; BAW-FuE-Projekt „Schifferzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten an Seeschiffahrtsstraßen“ - Schadensfälle an Hamburger Stacks, Hamburg 2011

Schiffserzeugter Sedimenttransport (SeST)

Netzplan-Nr.: A39550270142

Projektleiter: Dr.-Ing. K. Uliczka, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,
Referat Ästuarsysteme I (K2)

E-Mail: klemens.uliczka@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Im Rahmen der Betrachtung des tidebedingten Sediment- und Schwebstofftransports in den Seeschiffahrtsstraßen und der verstärkten Sedimentation in den anliegenden Hafenanlagen der Ästuar nach den vergangenen Ausbaumaßnahmen der Fahrrinnen stellte sich vermehrt in den letzten 10 Jahren die Frage nach dem Anteil von Schiffspassagen der immer größer werdenden Fahrzeuge am residuellen Sedimenttransport.

Im Auftrag des WSA Cuxhaven wurden daraufhin in 2006 an der Unterelbe im Bereich Lühesand „Naturmessungen zur Untersuchung residueller Sedimenttransporte tiefgehender Schiffe“ vorgenommen. Im Messbericht wurde festgestellt, dass „die Fragestellung, ob Passagen tiefgehender Schiffe einen signifikanten Einfluss auf die Sedimentdynamik im untersuchten Flussabschnitt nehmen, nicht abschließend geklärt werden konnte.“

Die daher weiterhin bestehende Fragestellung zum schiffserzeugten Sedimenttransport (SeST) in Seeschiffahrtsstraßen ist von der BAW im Rahmen der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße (WSS) zu bearbeiten. Die Dringlichkeit der Bearbeitung ergab sich durch die letztendliche Einbindung der FuE-Ergebnisse in die Bewertung von Ausbaumaßnahmen an den Seeschiffahrtsstraßen bei der heute zur Verfügung stehenden Messtechnik.

Nach einer ersten Schriftumsrecherche ist festzustellen, dass der schiffserzeugte Sedimenttransport zum einen hinsichtlich der Resuspension oder Erosion von Uferzonen in Binnengewässern oder an Küstenstreifen durch schiffserzeugte Wellensysteme untersucht wurde, die schiffserzeugte Suspensionserhöhung integral im Gewässerquerschnitt im Vergleich zu natürlich induzierten Werten abgeschätzt wurde, hauptsächlich aber Binnengewässer und Flüsse bei Passagen von Schubschiffen, Küstenmotorschiffen oder kleineren Schiffseinheiten wie auch Sportbooten untersucht wurden. Darüber hinaus wurden einfache analytische Ansätze entwickelt, mathematische Modellierungen eingesetzt und verglichen sowie z.B. hinsichtlich der Auswirkungen des Propellerstrahls vorhandene Ansätze auf der Basis neuer numerischer Modelle und Messungen in der Natur überprüft.

1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund der weiterhin zunehmenden Größenentwicklung der Containerschiffahrt (Inbetriebnahme von 14.000 TEU-Containerschiffen in 2010) und der erneut geplanten Anpassung der Fahrrinnen der Seeschiffahrtsstraßen an die Containerschiffahrt erhält die Kenntnis des schiffserzeugten Sedimenttransports als Teil des Sedimentregimes der Tideästuare eine wachsende Bedeutung. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollten im Rahmen von Strombau- und Sedimentmanagementkonzepten der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung (WSV) für die Seeschiffahrtsstraßen berücksichtigt werden.

Grundsätzlich sind mit entsprechendem Vorlauf die betroffenen Ämter der WSV sowie die zuständigen Lotsenbrüderschaften in das Vorhaben einzubinden.

1.3 Untersuchungsziel

Die wesentlichen, abschnittsunabhängigen Ziele der Untersuchungen für die Seeschiffahrtsstraßen sind:

- Grundsätzliche Erfassung des schiffserzeugten Sedimenttransports (SeST) mit u.a. instationärer schiffserzeugter Wasserspiegeländerung, instationärer schiffserzeugter Strömung in Betrag, Richtung und Verteilung, Turbulenzmaß und -ausbreitung, Suspensionskonzentration und deren verti-

- kale/horizontale Verteilung, Sedimentologie des Gewässerbetts, lokale Sohl- und Böschungsänderungen sowie relevante Daten der Schiffe und deren Passagen.
- Differenzierung des SeST, räumlich und prozessorientiert: Im Nahfeld des Schiffs mit dessen Anteilen, bewirkt durch die Verdrängungsströmung, durch strömungsinduzierte Druckänderung, durch den Propellerstrahl und/oder Nachstrom. Im Fernfeld mit den Anteilen aus Verdrängungsströmung, welleninduzierter Orbitalströmung. Im ufernen Bereich mit Anteilen aus Verdrängungsströmung, welleninduzierter Orbitalströmung, welleninduzierter Druckänderung/Turbulenz und Wellenumformungsprozessen.
 - Entwicklung empirisch-analytischer Ansätze zur Abschätzung des SeST in Seeschiffahrtsstraßen für das Nahfeld, das Fernfeld sowie die Uferzone sowie
 - Ermittlung des Anteils des SeST am Gesamttransport in einem Tideästuar.

2 Untersuchungsmethoden

Aufgrund der Abhängigkeit der tidebedingten und schiffserzeugten physikalischen Prozesse, die den SeST in einer Seeschiffahrtsstraße beeinflussen, können nur Messungen in der Natur über die Wirkzusammenhänge Aufschluss geben. Zur ganzheitlichen Betrachtung sind SeST-Messungen im Nah- und Fernfeld sowie in der Uferzone vorgesehen. Dazu sind neben einer vertieften Prozess- und Wissensstandsanalyse (AP1) verschiedenste Arbeitspakete erforderlich, die u.a. unter den folgenden Aspekten abgearbeitet werden.

Im AP2 sind Messungen, u.a. als Erprobung von Verfahren, unter kontrollierten Bedingungen bei geringem „Grundrauschen“ in der Seeschiffahrtsstraße Nordostsee-Kanal (NOK) vorzunehmen, um dann mit den geprüften Messverfahren in einem weiteren Schritt weitere Messkampagnen unter Tidebedingungen fortzuführen.

Analysen im Nahfeld von Schiffspassagen sollen detaillierte Einblicke in die physikalischen Prozesse der Schiffsumströmung und des SeST hinsichtlich des Einflusses z.B. der Verdrängungsströmung, des Propellerstrahls und/oder des Nachstroms geben. Zur ganzheitlichen Beschreibung des SeST in einem Querprofil ist die parallele Erfassung des SeST im Fernfeld und in der Uferzone denkbar.

Verschiedene Messverfahren wie u.a. stationäre ADCP-Messungen, instationäre ADCP / SES-Messungen mit begleitender Probenentnahme und weitere Systeme wie z.B. Fächersonarsysteme sind zu erproben und auf ihre Einsatztauglichkeit für die Messaufgabe zu überprüfen.

Die Messergebnisse der Hydrodynamik sowie des bereichsweisen schiffserzeugten Sedimenttransports sind prozessorientiert zu analysieren, als empirisch/analytische Ansätze zu formulieren und hinsichtlich des Genauigkeitsmaßes sowie der Gültigkeitsgrenzen zu betrachten.

Die in der Natur erfassten hydrodynamischen Prozesse bei der Umströmung eines Schiffs bei Revierfahrt werden zudem als weitere Validierungsdaten in dem laufenden FuE-Projekt Schiffshydrodynamik in Flachwasser SHD-F (BAW-Nr. A39550270133) verwendet.

3 Ergebnisse

Die in AP1 erarbeitete detaillierte Prozess- und Wissensstandsanalyse der Universität Siegen, Forschungsinstitut Wasser und Umwelt, kam u.a. zu dem Ergebnis, dass zum Einen viel versprechende Ansätze in der Kopplung von CFD-Verfahren aus dem Schiffbau mit numerischen Verfahren der Wellenausbreitung liegen und/oder dass zum Anderen eine entsprechende Modifikation und Erweiterung z.B. bestehender, modulbasierter kommerzieller Simulationssoftware mit empirisch/analytischen Ansätzen eine Basis für die qualitative Bewertung des schiffserzeugten Sedimenttransports in Tideästuaren sein kann (u.a. SHAIKH, 2011 bei FWU, 2011). Empfohlen werden u.a. umfangreiche synoptische Feldmessungen im Nah- und Fernfeld von Schiffspassagen zum Prozessverständnis sowie zur Validierung von numerischen Verfahren.

Um einen Einblick in die Vielfalt der Verhältnisse in der Wassersäule nach der Passage eines Schiffs zu erhalten, sind im AP2 stichprobenartig über einen längeren Zeitraum zeitlich und räumlich hochauflösende (Sonar-) Profilmessungen zur Erfassung der akustischen Signatur des Nachstroms im Nah-

feld eines passierenden Seeschiffs vorgenommen worden. Dazu waren weitere Parameter der Wasserstraße (u.a. Bathymetrie und Wasserstand) sowie der passierenden Schiffe (u.a. Länge, Breite z.B. aus AIS-Daten) mit den akustischen Signaturen zu verknüpfen und in einer Dokumentation der Messungen abzulegen. Die Analyse der akustischen Signaturen ermöglicht eine erste Diskussion, Wertung und Optimierung der eingesetzten Messverfahren und die Erörterung der Frage, welche Größenordnung an schiffserzeugter Sediment- oder Schwebstoffkonzentration zu erwarten sein wird. Mit der Erstellung erster akustischer Signaturen wurde das Northern Institute of Advanced Hydrogratics (NIAH) der HafenCity Universität Hamburg (HCU) beauftragt. Das NIAH der HCU hatte die entsprechenden fachspezifischen Voraussetzungen zur fachgerechten Erfassung und Bewertung der akustischen Signatur im Nachstrom von Seeschiffen, da es u.a. in weiteren Projekten neben akustik-basierten Strömungsanalysen auch die in einer Wassersäule vorhandenen Luftblasen analysiert (Water Column Imaging) und dementsprechend engen Kontakt zu Entwicklern von Hard- und Software im Bereich der Vermessung mit Unterwasserakustik verfügte. Die akustische Signatur des Wasserkörpers im Querprofil direkt hinter der Passage eines großen Containerschiff zeigt Änderungen in der Vertikalen im Bereich des Schiffskörpers (Sonarsystem INNOMAR SES 2000; Zeit: +0:14 [min]; ca. Elbe.km 642; etwa Thw). Besonderheiten des akustischen Signals sind Änderungen der lokal bekannten, schlackigen Sohlstruktur unter dem Druckfeld des Fahrzeugs, ein durchgehendes vertikales Rückstreufeld durch Sogkräfte des Schiffs und/oder den Propellerstrahl sowie stärkere oberflächennahe Signalstrukturen im Randbereich des Schiffs. Inwieweit die Rückstreusignale auf aufgewirbelte Schwebstoffe, Lufteintrag und/oder Turbulenzballen zurückzuführen sind, bedarf weiterer Untersuchungen mit Akustikspezialisten.

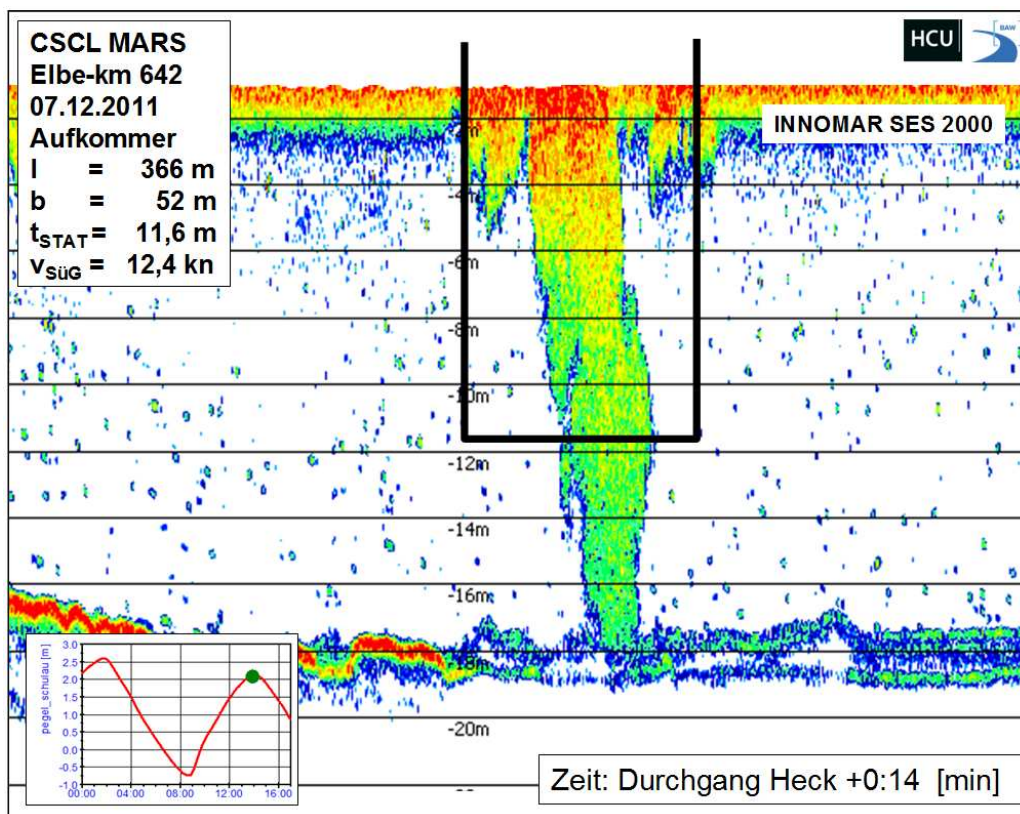


Bild 1: Akustische Signatur der Passage des großen Containerschiffs CSCL MARS bei Messungen mit dem Sonarsystem INNOMAR SES 2000 (HCU / BAW in 2011)

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die als weiteres Arbeitspaket im Rahmen des Gesamtprojekts vorgesehenen Untersuchungen im Nord-Ostsee-Kanal (NOK) gewährleisten kontrollierte Randbedingungen für erste Messungen und Geräteoptimierungen zur Erfassung des SeST.

Ausgehend von keiner bis maximal einer geringen Grundströmung im NOK ist dementsprechend mit keiner maßgeblichen natürlichen vertikalen Sediment oder Schwebstoffkonzentration in der Wassersäule zu rechnen. Sohl nah werden allerdings Ablagerungen feiner Sedimente erwartet, die nach Erosion an den Böschungen über Jahrzehnte auf der Fahrrinnensohle sedimentiert sind, wie Analysen der BAW ergaben.

Es wird davon ausgegangen, dass diese Sedimente durch schiffserzeugten Energieeintrag (u.a. Verdrängungsströmung, Propellersog, Nachstrom, Schiffswellen) in Suspension gelangen und die vertikale, schiffsinduzierte Sedimentkonzentration in Betrag und Verteilung erfasst werden kann, ohne dass natürliche Einflüsse durch Strömung und Turbulenz das Ergebnis zum SeST beeinträchtigen. Des Weiteren bieten die Untersuchungen im NOK auch die Möglichkeit, die Signalstreuung infolge Turbulenz- und Lufteintrag durch den Propeller und infolge schiffserzeugter Schwebstoffkonzentration zu separieren, ggf. Messsysteme dahingehend zu optimieren. Parallel läuft die Vorbereitung der weiteren AP's sowie die Diskussion für ein Verbundprojekt mit weiteren Partnern.

5 Literatur

FWU, 2011: Wissensstandsanalyse zum schiffserzeugten Sedimenttransport (SeST), Auftrag: WBL 250 D, Universität Siegen, Nov. 2011

Weiterentwicklung der Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen

Netzplan-Nr.: A39550370200

Projektleiter: Dr.-Ing. G. Lang, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,
Referat Ästuarsysteme II (K3)

E-Mail: guenther.lang@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Mathematische Verfahren wie *UNTRIM* und *UNTRIM²* (mit *SubGrid*) ermöglichen die numerische Simulation vieler für das Tidegebiet bedeutsamer physikalischer Prozesse [Casulli, V., 2008], [Casulli, V., Stelling, G. S., 2010]. Hierzu zählen u. a. die Ausbreitung der Tidewelle, der Wechsel von Ebbe- und Flutstrom, der Transport von Salz, Wärme oder Schwebstoffen im Wasserkörper, der sohlnahe Sedimenttransport, sowie der Austausch von Sedimenten zwischen Wasserkörper und Boden (Deposition und Erosion) zusammen mit der daraus resultierenden Veränderung der Morphologie.

In der Regel werden die Berechnungsergebnisse, beispielsweise Wasserspiegelauslenkung, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt, in äquidistanten Zeitabständen (z. B. alle 10 Minuten) in Dateien geschrieben. Diese *synoptischen* Datensätze können im Anschluss an die Simulation *visualisiert*, zu *Animationen* zusammengefasst oder weitergehend *analysiert* werden.

Wichtige Fragen zu den Konsequenzen anthropogener Eingriffe in das Tidegebiet, oder zu den Auswirkungen natürlicher Veränderungen (z. B. säkularer Meeresspiegelanstieg) auf das Systemverhalten, können in dem von hoher zeitlicher und räumlicher Variabilität geprägten Tidegewässern nicht, oder nur unzureichend durch ausschließliche Verwendung synoptischer Datensätze beantwortet werden. Hier bedarf es einer weiter gehenden Analyse der Simulationsergebnisse.

Derartige Analysemethoden werden seit Anfang der 1990er Jahre intensiv und erfolgreich in vielen Projekten eingesetzt. Sie sind unverzichtbarer Bestandteil praktisch aller für die WSV durchgeführten Arbeiten sowie verschiedener Forschungsprojekte. Allerdings bestehen folgende Beschränkungen:

- Es können nur Daten an den Knoten des Berechnungsgitters analysiert werden.
- Die Daten müssen in dem Dateiformat BDF (Binäres Daten Format) vorliegen, welches ausschließlich in der BAW benutzt wird.
- Eine Analyse von Daten mit SubGrid (HN-Verfahren UNTRIM²) ist nicht möglich.
- Die Softwarearchitektur der Analyseprogramme ist „in die Jahre gekommen“.
- Die Laufzeit der Analyseprogramme ist teilweise (zu) lang.
- Kenngrößen analog zu den in der Meteorologie benutzten *klimatologischen Statistiken* - also auf die Zeiteinheiten Tag, Monat, Quartal, Jahr, klimatologische Periode bezogene Größen – werden für „unsere“ Größen Wasserstand, Strömung usw. derzeit nicht berechnet.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die Berechnung von Kenngrößen aus den Ergebnissen mathematischer Verfahren ist integraler und daher unverzichtbarer Bestandteil praktisch aller für die WSV in Bezug auf Fragestellungen an den Seeschiffahrtsstraßen in der BAW durchgeführten Untersuchungen.

Bei den berechneten Kenngrößen handelt es sich in vielen Fällen um die in DIN 4049-3 Hydrologie definierten Größen. Daher sind die aus den Simulationsergebnissen abgeleiteten Kenngrößen allgemein bekannt, verständlich, und von unmittelbarem Nutzen für die Projektpartner in der WSV. Aber auch Dritte, beispielsweise externe Gutachter, die im Rahmen von Planfeststellungsverfahren für die WSV tätig sind, bauen ihre Gutachten zu einem guten Teil auf den von der BAW berechneten Kenngrößen auf. Als Beispiel siehe Bild 1.

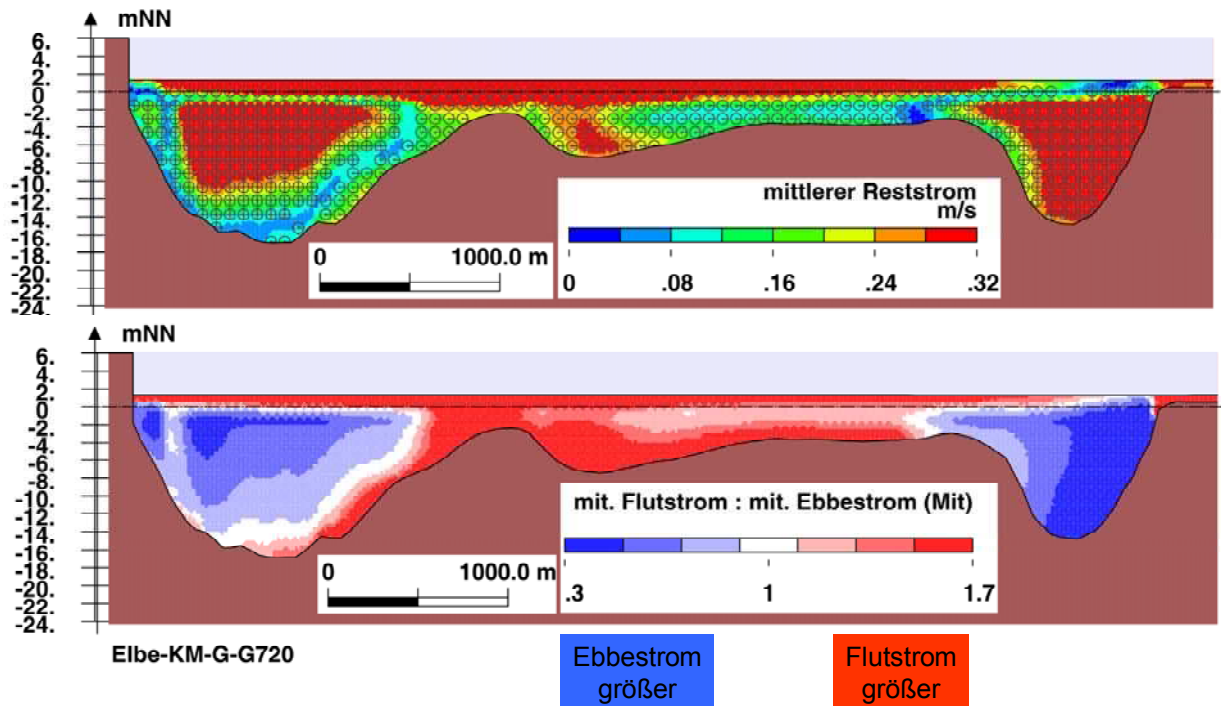


Bild 1: *Beispiel für die Möglichkeiten der Tide-Kennwert-Analyse: Mittlere Reststromgeschwindigkeit für einen Querschnitt bei Elbe-km 720 (50-fach überhöht). Links die tiefe Rinne mit dem Hauptfahrwasser. Rechts die kleinere und weniger tiefe Medemrinne. Dazwischen der flache Medemgrund. Blickrichtung stromabwärts, mit dem niedersächsischen Ufer auf der linken und dem schleswig-holsteinischen Ufer auf der rechten Seite. Der Reststrom ist im Kernbereich des Fahrwassers sowie in der Medemrinne seewärts (vom Betrachter fort) orientiert. Dem gegenüber weist der Reststrom auf dem flachen Medemgrund stromauf (auf den Betrachter zu). Dieselbe Orientierung kann man sohnah auch in der rechten Hälfte des Fahrwassers erkennen.*

In dem FuE-Projekt „UnTRIM SubGrid-Topografie“ (A39550370150) wurde das mathematische Verfahren UnTRIM² eingehend erprobt. Um UnTRIM² sinnvoll einsetzen zu können, müssen die Analysemethoden für SGT erweitert werden.

1.3 Untersuchungsziel

Überarbeitung vorhandener und Neuentwicklung fehlender Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen:

- Verbesserung der Softwarearchitektur – konzeptioneller Entwurf (**WP1**) :
 - Pakete.
 - Fortran90 Module.
 - Fortran90 PURE FUNCTIONS.
 - Externe Konfiguration der Berechnungsvorschriften für einzelne Kenngrößen.
- Verwenden eines des international gängigen Datei- und Metadatenstandards (**WP2**):
 - NETCDF Dateiformat.
 - CF Metadaten.
- Re-Integration der Analyse für knotenorientierte Daten (**WP3**).
- Erweiterung der Analyse für nicht knotenorientierte Daten: Kanten, Polygone, Zellen und Zellen-seitenflächen (**WP4**) .
- Erweiterung der Analyse für Daten mit SubGrid (HN-Verfahren UNTRIM²) (**WP5**) .
 - Überdenken der Definition der Kenngrößen.

- Berücksichtigen des nichtlinearen Zusammenhangs zwischen Wasserstand und durchströmter Fläche einerseits, sowie dem Wasservolumen andererseits.
- Reduzieren der Laufzeit (**WP6**):
 - Minimieren des Aufwands beim Lesen und Schreiben der Daten.
 - Parallelisierung (OpenMP, MPI).
- Integration neuer Analysemethoden (**WP7**):
 - „Klimatologische Kenngrößen“ für hydrodynamische Daten. Beispiele:
 - Wahrscheinlichkeiten für die Über- und Unterschreitung von Schwellenwerten.

2 Untersuchungsmethoden

Um die unter 1.1 aufgezählten Defizite beseitigen und die neuen Ziele erreichen zu können, muss zunächst ein konzeptioneller Entwurf für die neuen Datenanalyse-Programme erstellt werden. Teilweise müssen die Definitionen der Analysegrößen überarbeitet werden, um die aus der SubGrid Technologie resultierenden Anforderungen berücksichtigen zu können. Die Programmierung wird in Fortran95 erfolgen, damit vorhandene Software (PROGHOME) wieder verwendet werden kann. Als Dateiformat soll NetCDF mit CF Metadaten (siehe Veröffentlichungen) zum Einsatz kommen.

3 Ergebnisse

Zusammenarbeit mit *Deltares* (B. Jagers) zur Erweiterung des CF Metadatenstandards für unstrukturierte Gitternetze. Anwendung auf typische Datensätze, wie sie in dem Projekt Verwendung finden werden. Da das Projekt erst am 28. Oktober 2011 begonnen wurde, liegen noch keine nennenswerten Ergebnisse vor.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2011: **WP1** und **WP2**.
2012: **WP1**, **WP2**, **WP3**, **WP4** und **WP5**.
2013: **WP4**, **WP5** und **WP6**.
2014: **WP6**, **WP7**.

5 Literatur

Casulli, V., Stelling, G. S. (2010): Semi-implicit sub grid modelling of three-dimensional free-surface flows. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, derzeit nur Online verfügbar.
Casulli, V. (2008): A high resolution wetting and drying algorithm for free-surface hydrodynamics. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Band 60, Heft 4, 391 - 408.

6 Veröffentlichungen (BAWiki und Internet)

BAW *Analyse*: http://www.baw.de/methoden/index.php5/Analyse_der_Berechnungsergebnisse

BAW *NetCDF*: <http://www.baw.de/methoden/index.php5/NetCDF>.

Internet *NETCDF Dateiformat*: <http://cf-pcmdi.llnl.gov/>.

Internet *CF Metadaten*: <http://www.unidata.ucar.edu/software/netcdf/>.

Google Group *UGRID Interoperability* <http://groups.google.com/group/ugrid-interoperability>