

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Periodical Part, Published Version

Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.)

Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2012

BAWForschungskompodium

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/101764>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

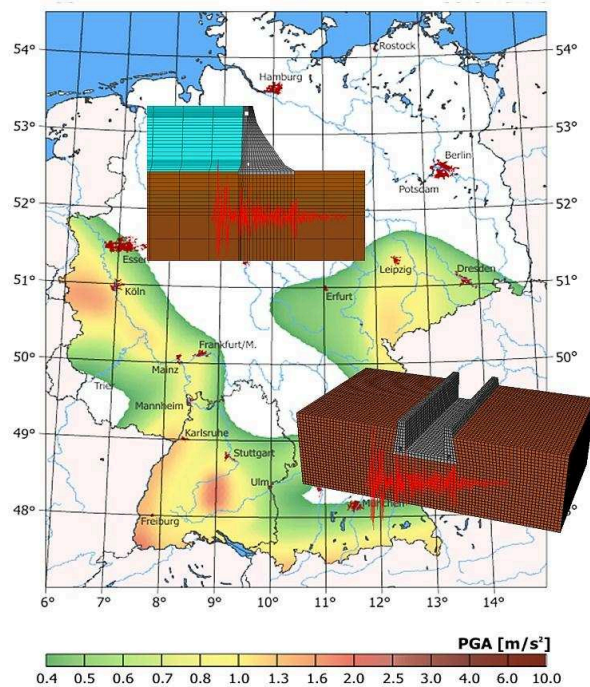
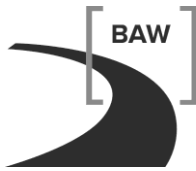
Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.) (2012): Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2012. Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau (BAWForschungskompodium).

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

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

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





Forschungskompodium Verkehrswasserbau 2012

Vorwort

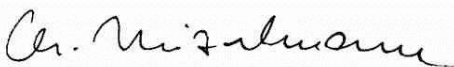
Mit ca. 90 aktiven Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE-Vorhaben) im Jahr 2012 hat die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) als technisch-wissenschaftliche Bundesoberbehörde dazu beigetragen, Wissenslücken im Verkehrswasserbau zu schließen und dabei praxisnahe, zukunftsweisende, kostengünstige und sichere Lösungen zu entwickeln.

Die verkehrswasserbauliche Forschung der BAW wird auf den Gebieten der Bautechnik, der Geotechnik, des Wasserbaus im Binnen- und Küstenbereich sowie der Informationstechnik wahrgenommen. Daneben gliedert sich die Forschung der BAW in die Forschungsbereiche: Innovative Technologien, Mobilität, Sicherheit und Schutz sowie Nachhaltigkeit und orientiert sich damit an den Zielen des 3. Verkehrsforschungsprogramms der Bundesregierung „Mobilität und Verkehrstechnologien“. Die BAW betreibt angewandte, praxisorientierte Forschung im Sinne einer Ressortforschung als originäre Aufgabe. Die Ressortforschung ist darauf gerichtet, Entscheidungshilfen zur sachgemäßen Erfüllung der verkehrswasserbaulichen Fachaufgaben der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) und des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) zu entwickeln.

Dem Ziel eines engen Bezugs zwischen der Ressortforschung einerseits und der praktischen Anwendung andererseits wird dadurch Genüge getan, dass die wissenschaftlichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der BAW sowohl Forschungs- und Entwicklungsvorhaben als auch Projektaufträge (Gutachten und Beratung) für die WSV bearbeiten. Diese Verzahnung trägt zur besonderen fachwissenschaftlichen Kompetenz der BAW bei und gewährleistet die schnelle Nutzung neuer Erkenntnisse. Zusätzlich wird die BAW aus dem 12 Mrd.-€-Programm der Bundesregierung für Bildung und Forschung durch Sondermittel für zeitlich befristetes Forschungspersonal, in 2012 mittlerweile 40 Stellen, verstärkt.

Die BAW bedient sich bei der Bearbeitung der FuE-Vorhaben der neuesten wissenschaftlichen und technischen Methoden. Für Zuarbeiten und Kooperation mit Hochschulen, Fachinstituten und Ingenieurbüros auf nationaler und internationaler Ebene standen im Jahr 2012 planmäßig rund 2,3 Mio € zur Verfügung.

Das vorliegende Forschungskompodium 2012 gibt einen vollständigen Überblick über die abgeschlossenen, laufenden und neu begonnenen Forschungsaktivitäten der BAW, dargestellt in Form von Kurzberichten.



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



Dipl.-Ing. Claus Kunz
Forschungskoodinator der BAW

Inhaltsverzeichnis

I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2012

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich ¹⁾	Seite
Empfehlungen zum Pollerzug (Trossenzugansatz) für Binnenschiffsschleusen	A39510210106	B	S	1
Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Schleusentoren aus Faserverbundwerkstoffen	A39510270001	B	I	5
Einfluss von Schalung und Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter Betonoberflächen	A39510310141	B	N	8
Adiabatische Wärmemessungen an ausgewählten Betonrezepturen	A39510310177	B	N	12
Textilbewehrte Vorsatzschalen zur Instandsetzung von Betonbauteilen	A39510310238	B	I	14
Numerische Modellierung von Bruchvorgängen in Böden	A39520210084	G	I	17
Hydraulischer Grundbruch in bindigen Böden	A39520305730	G	S	20
Setzungen von Sanden bei Schwingungsbelastung	A39520570001	G	S	24
Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)	A39530310105	W	M	27
Numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlick (MudSim)	A39550210093	KW	N	29
UnTRIM SubGrid-Topografie	A39550370150	KW	I	33
XtremRisk: Simulationen für extreme Sturmflut Szenarien in der Tideelbe	A39550370165	KW	N	36

II. Laufende FuE-Vorhaben in 2012

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich ¹⁾	Seite
Sicherheitskonzept für bestehende Wasserbauwerke (SiBeWa)	A39510070001	B	S	40
Entwicklung eines Erhaltungsmanagementsystems für die WSV (EMS-WSV)	A39510110139	B	S	43
Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf auf Kreuzungsbauwerke	A39510110178	B	S	46
Ermüdungssicherheit vollverschlossener Seile	A39510170001	B	S	49

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich^{η)}	Seite
Zwangsbeanspruchung bei dicken, gerissenen Stahlbetonquerschnitten	A39510170002	B	N	52
Korrosionsschutz mit Blatt 87 - Untersuchungen zu Zwischenhaftungs- und Farbproblemen	A39510210309	B	I	54
Korrosionsschutz von Stahl in Beton - Untersuchungen zum Kathodenschutz der Straßenbrücke B500 über den Rhein bei Iffezheim	A39510270002	B	I	58
Korrosionseigenschaften von Spundwandstählen	A39510270003	B	N	62
Frostwiderstand zementgebundener Baustoffe	A39510308099	B	N	65
Instandsetzungssysteme für alte Wasserbauwerke	A39510310127	B	N	68
Injektion Vorsatzschale	A39510310234	B	I	71
Dauerhaftigkeitsbemessung von Wasserbauwerken	A39510310240	B	N	73
Überarbeitung des Turbulenzprüfverfahrens für Geokunststoffe	A39510370001	B	N	77
Betone für massige Bauteile von Wasserbauwerken	A39510370003	B	I	79
Messverfahren Hydratationswärme	A39510370004	B	N	81
Verwendung von Acylatgelen und gelartigen Produkten für Instandsetzungsmaßnahmen an Massivbauwerken im Verkehrswasserbau	A39510370005	B	I	83
Ertüchtigung der Bewegungsfugen von Massivbauwerken im Verkehrswasserbau	A39510370006	B	N	86
Mauerwerk im konstruktiven Wasserbau	A39510370007	B	I	88
Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung	A39510370008	B	N	90
Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen	A39510370009	B	N	93
Parameter für Stoffgesetze bei FE-Berechnungen	A39520205613	G	I	96
Bruch- und Verformungsverhalten von rutschgefährdeten Böschungen unter Berücksichtigung des Dreiphasensystems	A39520210001	G	S	99
Böden unter Stoßbelastung	A39520210014	G	S	102
Modellierung der Verformung nichtbindiger Böden unter zyklischer Belastungseinwirkung von Schleusenbauwerken	A39520210045	G	N	105

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich ^{η)}	Seite
Wechselbelastungen an Kleinverpresspfählen	A39520270001	G	S	108
Bewertung dynamischer Probelastungen von Bohrpfählen	A39520270002	G	S	112
Hydraulischer Grundbruch unter unterströmten Bauwerken mit luftseitigen Auflastfilter	A39520370001	G	S	115
Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser	A39520370002	G	N	118
Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke	A39520410006	G	N	121
Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung	A39520410076	G	N	123
Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen – Quantifizierung ihrer Belastbarkeit und Möglichkeiten ihrer Anwendung an Binnenwasserstraßen	A39520410151	G	N	125
Ausbildung von Dichtungsanschlüssen im Streckenbereich von Wasserstraßen	A39520410217	G	S	129
Filterstabilität grober Gesteinskörnungen	A39520470001	G	S	132
Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit	A39520470002	G	N	135
Erosion von Dichtungstonen und bindigen Böden unter Strömungsbelastung	A39520470003	G	S	138
Entwicklung des Zustands von Deckwerken bei Absenkung des technischen Standards	A39520470004	G	N	140
Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen	A39520570002	G	S	143
Einfluss der Vorlandvegetation auf den Hochwasserabfluss und die Sohlstabilität in Bundeswasserstraßen	A39530110036	W	N	146
Untersuchung der Prognosefähigkeit von mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen an spezifischen Fragestellungen aus dem Flussbau	A39530110064	W	I	149
Verkehrswasserbauliche Regelungs- und Anpassungsoptionen an klimabedingte Veränderungen des Abflussregimes	A39530170001	W	M	153
Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen	A39530170002	W	N	157
Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen	A39530170003	W	N	160

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich^η	Seite
Hydraulische Wirkung von Stromregelungsbauwerken	A39530210077	W	N	164
Adaptierung und Erweiterung von Casulli-Algorithmen für Parallelrechner mit Hardware-Beschleunigung und zur Anwendung von konservativen Advektionsverfahren	A39530270001	W	I	168
Effizienz- und Genauigkeitssteigerung der Modellierung der Hydrodynamik der Flüsse mit einem kombinierten Multigrid- und Subgrid-Ansatz	A39530270002	W	I	172
Bemessung und Konstruktion von Schlauchwehren	A39530370001	W	I	175
Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen	A39530410035	W	M	179
Wartezeiten vor Engstellen	A39530410036	W	M	181
Mindestabstände Schiff - Sohle zur Vermeidung von Steinschlägen	A39530410037	W	S	183
Einwirkung des Propellerstrahls auf die Gewässersohle	A39530410038	W	N	185
Ermittlung notwendiger Fahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt	A39530470001	W	M	190
Erweiterung des Binnenschiffsführungssimulators um die Berechnung schiffsinduzierter Wellen und Verbesserung des fahrdynamischen Modells	A39530470003	W	M	194
Konsolidationsverhalten von Baggergut (Schlick)	A39550110100	KG	N	198
Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau	A39550110158	KG	N	201
Deckwerksanalyse mit der Distinkt Element Method (DEM)	A39550170270	KG	I	204
Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen	A39550170318	KG	S	207
Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiff-fahrtsstraße - Schiffsdynamik	A39550210055	KW	M	210
AufMod - Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht	A39550270116	KW	I	213
Schiffsführungssimulation der Revierfahrt (SFS-R)	A39550270132	KW	M	218
Numerische Berechnung der Schiffshydrodynamik und Manövrierfähigkeit im Flachwasser (SHD-F)	A39550270133	KW	M	222
Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen	A39550270141	KW	N	225

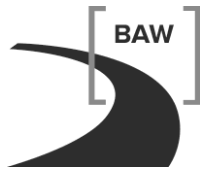
Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich ^{η)}	Seite
Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen	A39550270142	KW	N	228
KLIWAS – K3	A39550310162	KW	M	232
KLIMZUG-Nord – Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg	A39550370163	KW	N	236
Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph	A39550370178	KW	N	238
Interaktion von Sedimenttransport und Wasserqualität in dreidimensionalen Ästuarmodellen	A39550370190	KW	I	241
Weiterentwicklung der Methoden zur Analyse von Simulationsergebnissen	A39550370200	KW	I	244
Marine Dateninfrastruktur Deutschland; Vorhaben: Küsteningenieurwesen und Küstenschutz	A39550670400	K (KFKI)	I	247

III. Neue FuE-Vorhaben in 2012

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich ^{η)}	Seite
Bemessungskonzept für Wasserbauwerke auf Erdbeben	A39510170003	B	S	251
Materialkombinationen für das System Laufrad/Laufschiene	A39510270004	B	N	254
Energetische Optimierung der WSV-Gebäude	A39510470001	B	N	256
Modellierung des Tragverhaltens von Verpressankern in Sand	A39520270003	G	S	258
Kolmation als Schlüsselgröße der Interaktion Oberflächenwasser – Grundwasser	A39520370003	G	N	261
Numerische Simulation von hydraulisch induziertem Sedimenttransport in Erdbauwerken	A39520470005	G	I	265
Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen	A39530170004	W	N	267
Untersuchungen zur Herstellung bzw. Verbesserung der Sedimentdurchgängigkeit an der Staustufe Iffezheim	A39530170005	W	N	270
Entwicklung eines vereinfachten Füllsystems für Sparschleusen	A39530370002	W	M	273

Bezeichnung	Auftragsnummer	Abteilung	Forschungsbereich¹⁾	Seite
Koordinierte Bewirtschaftung von Staustufenketten – Modellierung und Betrieb	A39530370003	W	M	276
Integration mehrdimensionaler Modelle in GBBSOft	A39530470004	W	N	279
Untersuchungen zur Sohl- und Uferbeanspruchung aus Schlagflächenantrieben	A39530470005	W	N	281
Numerische Modellierung von Transportkörpern (Dünen) in Binnenwasserstraßen	A39530570001	W	N	285
Störung des Baugrundes durch Kampfmittelsondierungen	A39550170362	KG	S	288
Berücksichtigung von beweglichen oder fixen Strukturen (Schiffen) an der freien Wasseroberfläche im hydrodynamisch numerischen Modell UnTRIM	A39550270149	KW	I	291
Feststofftransport in Ästuaren	A39550270150	KW	I	293

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



I. Abgeschlossene FuE-Vorhaben in 2012

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 vor 1984 haben sich mit den Festlegungen in DIN 19703, Ausgabe 11/1995, die auf der Einwirkungsseite anzusetzenden Bemessungswerte für Poller und ihre Verankerungen in Binnenschiffsschleusen 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: $R_D = f_{y,k}/\gamma_M$ ^{*)}
Poller	200	1,5	300	1,1
Halteringe	100	1,5	150	1,1
Verankerung	300	1,5	450	1,1

^{*)} $f_{y,k}$... Streckgrenze der gewählten Stahlsorte

1.2 Bedeutung für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV)

Mit den erarbeiteten Ergebnissen kann das Tragverhalten von Pollerkonstruktionen realitätsnah eingeschätzt werden. Damit kann die Sicherheit der Pollerkonstruktionen im Sinne der Verkehrssicherungspflicht und der Umfang evtl. Umrüstungs- bzw. Ertüchtigungsmaßnahmen genauer definiert werden. Des Weiteren können alle erforderlichen Maßnahmen in differenzierter Form vorgenommen werden und es kann ggf. auch auf eine Umrüstung oder Ertüchtigung verzichtet werden.

1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen des FuE-Themas sollten Empfehlungen zum Trossenzug-Ansatz erarbeitet werden, die einerseits möglichst wirklichkeitsnah sind (z. B. auch für Festmachevorrichtungen kleinerer und älterer Schleusen zutreffen) und andererseits bei ausreichendem Sicherheitsniveau Wirtschaftlichkeitsaspekte berücksichtigen. Ziel der Untersuchungen war auch, die Ergebnisse umfangreicher Pollerzugversuche darzustellen und zu bewerten und eine statische Neubewertung des Tragsystems "Pollerzapfen-Unterkonstruktion" vorzunehmen.

2 Untersuchungsmethoden

Anhand vergleichender Betrachtungen sollte im Sinne des Untersuchungsziels festgestellt werden, ob und wie sich die Bemessungswerte zum Trossenzug-Ansatz in Abhängigkeit von der Wasserstraßenklasse bzw. dem System Schiff-Trosse und der Schiffsgrößenverteilung begründbar modifizieren lassen. Grundlage für den Vergleich mit den Festlegungen des aktuellen Regelwerks bildete dabei die Auswertung und Umsetzung entsprechender Fachliteratur und Richtlinien, die Ermittlung zutreffender, klassifizierungsabhängiger Schiffsgrößenverteilungen und auch das Ergebnis von Zugversuchen. Für das mit herkömmlichen Berechnungsmethoden nur unzureichend bewertbare Tragverhalten des Koppelsystems "Pollerzapfen-Unterkonstruktion" waren spezielle Untersuchungen mittels FEM vorzu-

nehmen, die vor allem auch die differenzierten Formen und Materialien der Zapfeneinpassung in den Pollerstuhl berücksichtigen sollten.

3 Ergebnisse

Regelwerksvergleich

Bei dem Rahmen der Themenbearbeitung vorgenommenen Vergleich und der Gegenüberstellung von nationalen und internationalen Regelwerken ergibt sich eine ganze Reihe von Unklarheiten, Interpretationsschwierigkeiten und auch Widersprüchlichkeiten. Anhand des Regelwerksvergleichs und der auf dieser Grundlage mit unterschiedlichsten Ansätzen vorgenommenen rechnerischen Untersuchungen zeichnete sich letztlich ab, dass der günstigste Weg für die Ermittlung/Festlegung realitätsnaher und wirtschaftlicher Trossenzüge für die Binnenschiffsschleusen über die Anwendung des Prinzips der schiffsgrößenabhängigen Trossenbruchlasten führt.

Beanspruchungsgrundsätze

Die Beanspruchung eines Pollers 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).

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 1 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 1a, b und c: Typische Situationen beim Festmachen, Spannen und Lösen der Trossen an Nischenpollern

Vorschläge für gestaffelte Ansätze von Bemessungswerten für Pollerzüge

Die Untersuchungsergebnisse lassen erkennen, dass in Binnenschiffsschleusen neben den Steifigkeits-Kennwerten der Trosse die Schiffsmasse, Einfahrtgeschwindigkeit und (wirksame) Trossenlänge die maßgebenden Parameter sind. Unter Berücksichtigung einer 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. Beispielrechnungen haben unter dieser Voraussetzung für den Pollerzapfen einen Pollerzugwert von $P_z \approx 200 \text{ kN}$ ergeben, welcher gut mit den in den Klassifikations- und Bauvorschriften des Germanischen Lloyd und anderen Regelwerken angegebenen Bruchlasten für Festmachertrossen korreliert. Es wurde erkennbar, dass sich für die Ermitt-

lung/Festlegung realitätsnaher und wirtschaftlicher Trossenzüge für Binnenschiffsschleusen als günstigster Weg jener über die Anwendung des Prinzips der Trossenbruchlasten abzeichnet, die durch Ausrüstungsvorschriften vorgegeben werden und letztlich auf Basis der Klassifikation der bundesdeutschen und europäischen Binnenwasserstraßen entsprechenden Wasserstraßenklassen und damit auch Schiffsgrößen (Typ des Schiffes bzw. Art des Verbandes, allgemeine Merkmale wie Länge-Breite-Tiefgang und Tonnage) zugeordnet werden können. Generelles Ergebnis war insofern, dass es möglich und zweckmäßig ist, bei ausreichendem Sicherheitsabstand zu den in Regelwerken benannten Trossenmindestbruchlasten gestaffelte Bemessungswerte für Pollerzüge in den unteren Wasserstraßenklassen I bis IV festzulegen, während für die Wasserstraßenklassen Va und Vb die gemäß DIN 19703 vorgegebenen Bemessungswerte der Pollerzüge beibehalten werden können.

Diese Vorgehensweise wird auch durch die 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. Da der Haltebolzen (Pollerzapfen) unabhängig von der Lastrichtung am stärksten beansprucht wird, wurden im Rahmen des FuE-

Vorhabens zur genaueren Beurteilung seines Tragverhaltens für einen besonders häufig verwendeten Nischenpollertyp mit dem Programmsystem ANSYS nichtlineare FEM-Berechnungen für unterschiedliche Lastfälle, Materialkombinationen und Pollergeometrien aufgestellt (Bild 2).

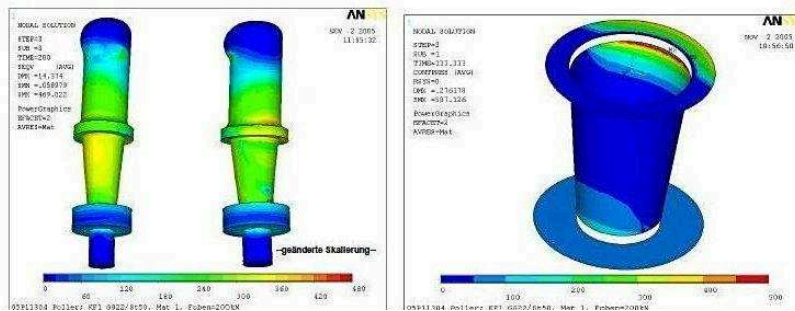


Bild 2: Konstruktionsform 1 (konischer Zapfen St 50; Gehäuse GG22), Vergleichsspannung und Kontaktpressung bei $P_{z,oben} = 200 \text{ kN}$

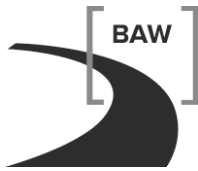
Zu dem mit der Frage des Trossenzug-Ansatzes in direktem Zusammenhang stehenden Umrüstungsbedarf an Pollern der Binnenschiffahrtsschleusen wurden in einem bereits im Dezember 2007 an das BMVBS gegebenen BAW-Bericht Entscheidungsgrundsätze benannt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Der Regelwerksrückblick, die geschichtliche Entwicklung bei den Pollerkonstruktionen, die den Kern des FuE-Vorhabens darstellenden Untersuchungsergebnisse für Empfehlungen zum Trossenzug-Ansatz wie auch die Ergebnisse der Pollerzugversuche und der für differenzierte Zapfenformen geführten FEM-Berechnungen wurden im Einzelnen in einem Abschlussbericht mit einer Vielzahl von Abbildungen, Grafiken und Literaturangaben zusammengefasst. Der Abschlussbericht wurde Ende 2012 fertig gestellt und wird demnächst auch in EWISA aufrufbar sein.

Als ein mit dem Trossenzug-Ansatz für Poller in Binnenschiffsschleusen (Schleusenammern) in sehr engem Zusammenhang stehendes Problemfeld hat sich in letzter Zeit bei dem für die Poller an Liegestellen und für Dalbenpoller zu treffenden Lastansatz aufgetan, wo sich künftiger Untersuchungsbedarf abzeichnet.

Der als Ersatz für DIN 19703: 1995-11 vorgesehene Entwurf E-DIN 19703, Ausgabe Dezember 2012, liegt inzwischen im Gelbdruck vor. Es ist davon auszugehen, dass sich hinsichtlich der Lastansätze bei Pollern keine Änderungen ergeben werden. 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 gestaffelte Trossenzug-Ansätze vor allem auch für



ältere und kleinere Schleusenbauwerke zu entwickeln, wird insofern von der Fortschreibung/Überarbeitung der Ausrüstungsnorm unberührt bleiben. Zu überlegen wäre noch, ob in den Weißdruck Hinweise auf eine ggf. differenzierbare Verfahrensweise beim Trossenzug-Ansatz mit aufgenommen werden sollten.

Laufzeit des Vorhabens von 2002 bis 2012.

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

1.2 Bedeutung für die WSV

Ein Großteil der Schleusen im Bereich der WSV wurde vor dem Krieg errichtet und hat somit die normative Nutzungsdauer bereits erreicht und z.T. bereits deutlich überschritten. Dies trifft vor allem für Schleusen an Nebenwasserstraßen zu. Die Torarmaturen (Füll- und Entleerungsschütze, Antriebe etc.) entziehen sich auf Grund ihres Designzeitpunktes (viel Personal zur manuellen Bedienung) dem Ziel, diese Anlagen zu automatisieren bzw. fernzusteuern. Aus den genannten Gründen besteht in 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 im Dezember 2008 der BAW übergeben. In der zweiten, abschließenden Phase wurde 2012 die weiterführende Entwicklungsarbeit in Bezug auf die Basisdimensionierung und damit die Festlegung der wesentlichen Konstruktions- und Kostendaten eines Standard-

Stemmtores für Kleinschleusen in Faserverbund-Leichtbauweise ebenfalls an die ADETE-GmbH vergeben.

Die Torflügel-Querschnittsform, siehe Bild 1, ist so gewählt, dass 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. Die Stemmtorkonstruktion wird an den Wende- und Schlagsäulen sowie an den Drempeldichtungen mittels metallischer U-Profile gehalten. Die Auflagerung flächig erfolgt linienförmig parallel oder gänzlich über die seitliche Dichtung.



Bild 1: *Bauraumgerechte Gestaltung der Torflügelform*

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

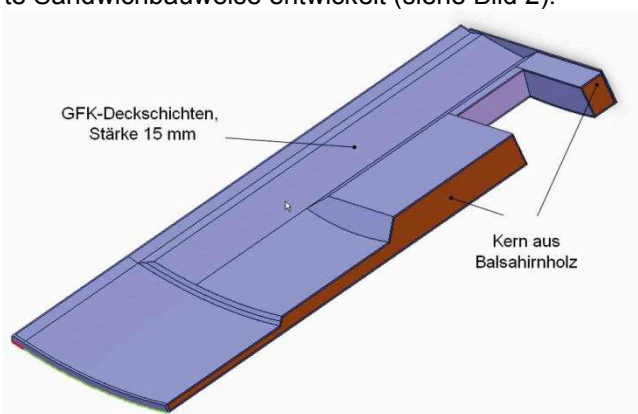


Bild 2: *Schnitt durch die 6 m hohe Referenzkonstruktion*

Die Tragmembran der Konstruktion besteht aus einem 15 mm dicken, glasfaserverstärkten Epoxid-Laminat, mit symmetrischem Lagenaufbau im ausgeglichenen Winkelverbund (quasiisotrope Werkstoffkennwerte). Durch ein Epoxidharzsystem ist die geforderte Wasserbeständigkeit gewährleistet. Die UV-Beständigkeit wird mit im Bootsbau üblichen Lackschichtsystemen gesichert. Die Designlebensdauer der KKV-Konstruktion ist gleichwertig zu vergleichbaren Stahlkonstruktionen.

Der vom Laminat umschlossene Kernwerkstoff besteht aus Balsahirnholz, welches lastkonform in unterschiedlicher Schichtdicke eingebracht wird. Balsa ist ein nachwachsender, in der Faserverbundtechnik bewährter Werkstoff (z.B. Schiff- und Schienenfahrzeugbau).

Die Masse der Torflügel reduziert sich im Vergleich zu einer konventionellen Stahlkonstruktion um ca. 50 %. Die vorhandenen Hals- und Spurlagerkonstruktionen werden weiter verwendet. Die Lastabtragung in Stemstellung 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 deutlich unterhalb der zulässigen Werte (siehe Tabel-

le 1). Dies gilt auch für Eisdruck und den Revisionszustand. 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	

- Eine Grunddimensionierung des Tores auf Basis der größten Beanspruchung wurde nachgewiesen und wird empfohlen. Kleinere Tore können unter Anpassung der Geometrie ohne weitere Nachweise und Veränderung des Faserverbund-Setups übernommen werden, Es kann somit eine standardisierte Konstruktion verwendet werden. Die gewählte Einheitstorkonstruktion erfüllt alle statischen und materialtechnischen Anforderungen. Sie ist in dieser Hinsicht einer Stahlkonstruktion ebenbürtig und durch am Markt etablierte und verfügbare Fachbetriebe problemfrei herstell- und wartbar. Die Konstruktion ist im Vergleich zu Stahltores deutlich toleranter gegenüber Wartungsdefiziten.

- Ein in Kleinserie gefertigtes GFK-Schleusentor ist in der Planung und Herstellung im Vergleich zu einer adäquaten Stahlkonstruktion kostenneutral, Die laufenden Betriebs- und Wartungskosten sind deutlich geringer als bei einem Stahltor. Hier ist bei der Beschichtung mit ca. 80% und beim allgemeinen Betrieb mit ca. 20% Kostenreduzierung auszugehen. Weitere Vorteil wie die leichtere Konstruktion und die geringere Oberfläche, begünstigen das Handling bzw. die Wartung, lassen sich aber derzeit jedoch nicht quantifizieren..

Zusammenfassung: Die hier vorgestellten Arbeiten zeigen das technische und wirtschaftliche Potential eines Stemmtores für Kleinschleusen in Faserverbundbauweise auf. Konkret ist die Ausführung einer einzigen, maximal dimensionierten Konstruktion mit adaptierbaren Abmessungen möglich und sinnvoll. Für die Umsetzung wurden konstruktive Lösungen erarbeitet und dargestellt. Der Kosten für Herstellung, Wartung und Revision wurden betrachtet und wirtschaftliche Konzepte vorgestellt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Mit dem Abschluss der Phase 2 „Basisdimensionierung und Festlegung der wesentlichen Konstruktions- und Kostendaten eines Standard-Stemmtores für Kleinschleusen in Faserverbund-Leichtbauweise“ wurde der Forschungsauftrag „Machbarkeitsstudie zum Einsatz von Schleusentoren aus Faserverbundwerkstoffen“ 2012 beendet.

Laufzeit des Vorhabens von 2008 bis 2012.

Einfluss von Schalung und Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter Betonoberflächen

Netzplan-Nr.: A39510310141

Projektleiter: Dr.-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. Bei unzureichender Nachbehandlung trocknet der Beton frühzeitig aus und nahezu alle dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften können nachteilig beeinflusst werden. Besonders bei im Wasserbau meist eingesetzten langsam erhärtenden Betonen wirkt sich eine unzureichende Nachbehandlung deutlich aus. In der 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 während der Nutzungsphase günstiger und Ausfallzeiten aufgrund von Instandsetzungsmaßnahmen geringer. Zu prüfen ist, ob unter bestimmten Randbedingungen eine Reduzierung des Aufwands für die Nachbehandlung möglich ist, ohne dass dies zu Nachteilen bei Betrieb und Unterhaltung der Bauwerke führt.

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 geschalter massiger Betonbauteile. Der Vergleich unterschiedlich nachbehandelter Betonoberflächen soll Aufschluss über den Einfluss der einzelnen Varianten geben. Die Untersuchungen werden im Hinblick auf einen etwaigen Änderungsbedarf der ZTV-W LB 215 bzw. LB 219 bewertet.

2 Untersuchungsmethoden

2.1 Betonzusammensetzung und Probekörperherstellung

Im Verkehrswasserbau liegen in der Regel typische dauerhaftigkeitsrelevante Hauptbeanspruchungsgruppen für massige Bauteile vor. An Schleusenwandwänden zwischen Unter- und Oberwasser oder an vergleichbaren Bauteilen wird meist die Expositionsklasse XF3 in Kombination mit XC2 und ggf. XM1 maßgebend. Betone unter dieser Beanspruchung können sowohl mit als auch ohne künstliche Luftporen hergestellt werden. Da Betone ohne Luftporen für XF3-Bauteile im Bereich der WSV nur selten Verwendung, kamen Luftporenbetone unter Variation des Bindemittels zum Einsatz. Zur Berücksichtigung der Randbedingungen massiger Bauteile wurden die Untersuchungen an insgesamt sieben unter Baustellenbedingungen hergestellten großformatigen Probekörpern mit einer Blockhöhe von etwa 2 m durchgeführt. Weiterhin wurden die Temperaturänderungen in der Randzone mittels tiefengestaffelt messender Temperatursensoren erfasst und die Austrocknung der Probeflächen indirekt über eine tiefengestaffelte Messung des Elektrolytwiderstand mittels Multiring-Elektroden (MRE) gemessen.

2.2 Wahl der Nachbehandlungsvarianten

Zur Nachbehandlung wurden Schalldauer und Schalhaut variiert. Als optionale Sekundärmaßnahmen wurden ein Nachbehandlungsmittel (NBM) auf Parafinbasis eingesetzt bzw. wurden alternativ die entschalteten Flächen zugluftfrei mit feuchter Jute und Folie abgehängt. Als Sonderfall wurde eine siebentägiger Befeuchtung nach dem Ausschalen sowie ein alternatives Nachbehandlungsmittel untersucht.

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. 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 Unterschiede zwischen schlanken und massigen 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 unterschiedlicher Schalldauer anhand von tiefenabhängigen Temperaturmessdaten und Widerstandsprofilen zu verschiedenen Zeitpunkten. Insbesondere der Bereich bis etwa 10 mm ist vom Austrocknungsvorgang betroffen.

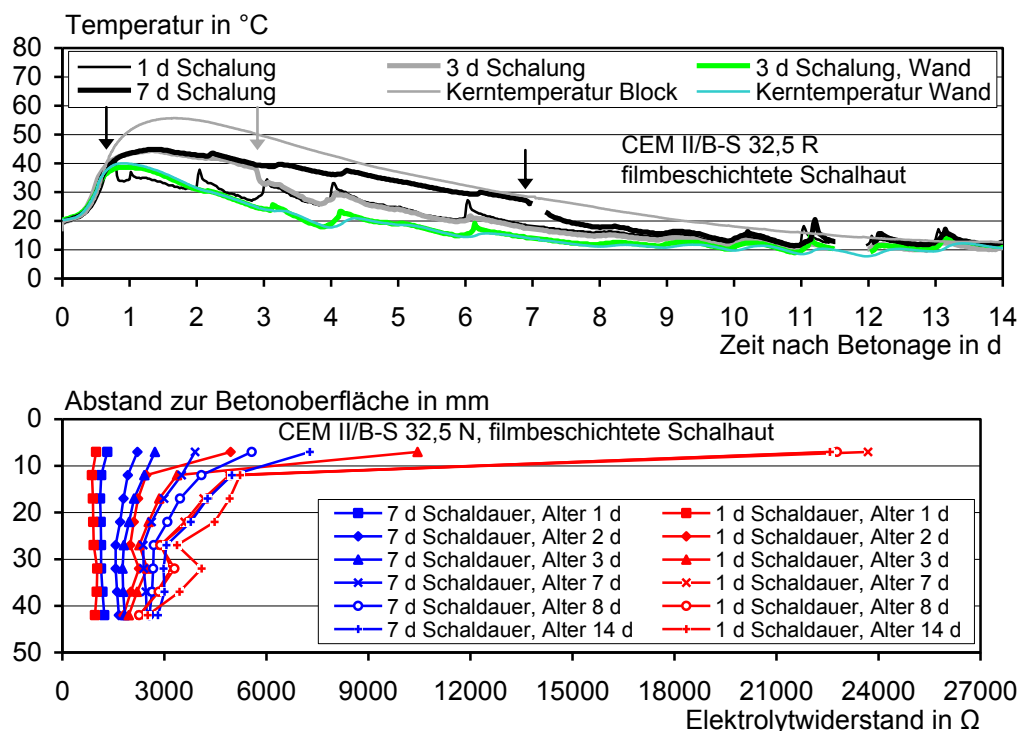


Bild 1: Temperaturentwicklung und Widerstandprofile in Abhängigkeit des Ausschalzeitpunktes

3.2 Ergebnisse der Bohrkernuntersuchungen

Zur Einordnung des Einflusses der Nachbehandlung sind in Bild 2 exemplarisch der Wasseraufnahmekoeffizient und der Chloridmigrationskoeffizient zur Beschreibung verschiedener Transportmechanismen in Abhängigkeit der Nachbehandlungsart und -dauer dargestellt. Durch die von drei auf sieben Tage verlängerte Schalldauer ist bei der filmbeschichteten Schalhaut eine Reduzierung des Chloridmigrationswiderstandes und des Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgt. Bei Betrachtung gleicher Schalldauer verbessert sich der Chloridmigrationskoeffizient durch die Sekundärmaßnahmen weder bei drei- noch bei siebentägiger Schalldauer wesentlich, beim Wasseraufnahmekoeffizienten erfolgte nur bei dreitägiger Schalldauer tendenziell eine Verringerung. Bei siebentägiger Schalldauer fällt der Kennwert nur beim NBM etwas günstiger aus als ohne Sekundärmaßnahme. Die wasserabführenden Schalungsbahnen führen mit Abstand zu den deutlichsten Verbesserungen dieser beiden Koeffizienten. Bei anderen, hier nicht dargestellten Untersuchungen wurden diese Beobachtungen tendenziell bestätigt. Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen in erster Linie als Grundlage für eine etwaige Anpassung der Anforderungen an die Nachbehandlung gemäß ZTV-W LB 215 dienen. Das Projekt wurde in 2012 mit einem Abschlussbericht beendet.

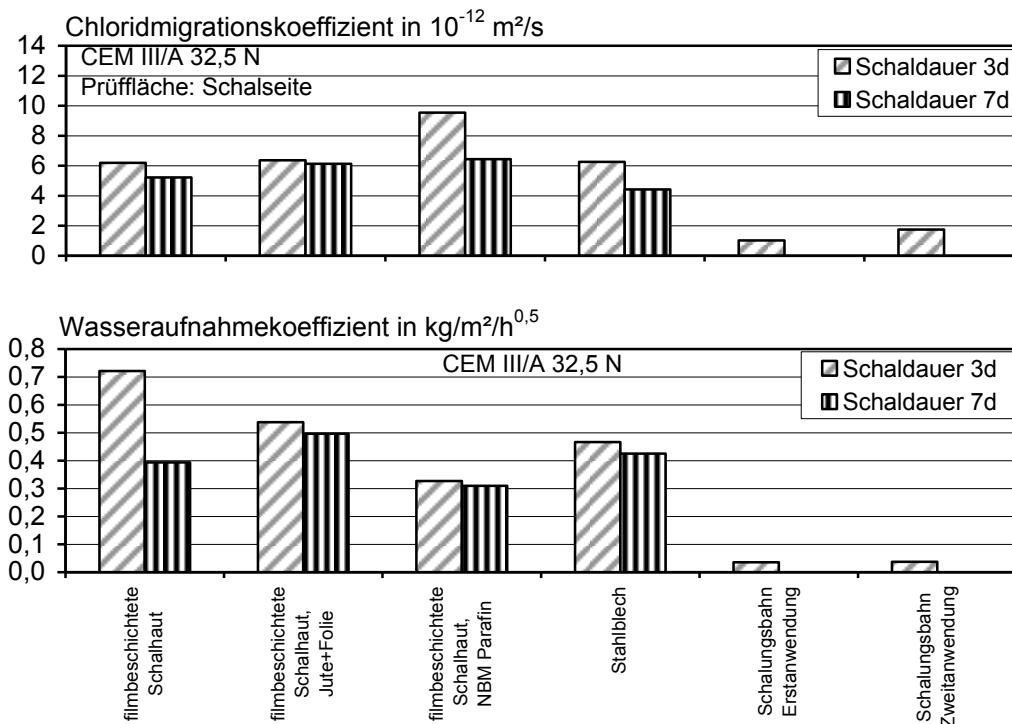


Bild 2: Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit der Nachbehandlungsart und –dauer

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

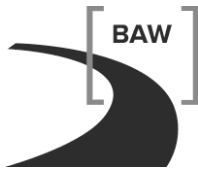
2012: Fertigstellung des Abschlussberichtes und Projektabschluss

Laufzeit des Vorhabens von 2003 bis 2012.

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 2012



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
- Spörel, F.; Müller, H.; Westendarp, A.: Einfluss der Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit massiger Betonbauteile. In: Tagungsband 18. Internationale Baustofftagung (ibausil), S. 2-0051 – 2-0058, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus Universität Weimar, 2012
- Spörel, F.; Müller, H.; Westendarp, A.: Untersuchung des Einflusses von Schalung und Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter Betonflächen massiger Betonbauteile. Abschlussbericht zum FuE-Projekt A39510310141, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2012
- Spörel, F.; Müller, H.; Westendarp, A.: Einfluss der Nachbehandlung auf die Dauerhaftigkeit geschalter massiger Betonbauteile. In: Beton 63 (2013), Nr. 4 (in Vorbereitung)

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**

Die Hydratation des Zementes im Beton ist eine exotherme, chemische Reaktion. Durch die exotherme Reaktion wird Wärme freigesetzt. Bei den im Hochbau üblichen Bauwerkskubaturen kann die entstandene Wärme problemlos zur Bauteiloberfläche hin abfließen. Diese Bauteile erwärmen sich bei der Herstellung nur unwesentlich. Bei Bauteilen mit einem ungünstigem Verhältnis zwischen Oberfläche und Volumen kann die durch die Hydratation entstandene Reaktionswärme nicht schnell an die Umgebung abgegeben werden. Dies führt zu einem Anstieg der Bauteilkerntemperatur und zu einem großen Temperaturgradient zwischen Bauteilkern und Bauteiloberfläche. Im Verlauf der Abkühlung kommt es durch Zwangsspannungen zu Rissen im jungen Beton. Dieser Rissgefahr wird auf der konstruktiven Seite über eine entsprechende Bemessung begegnet. Die Grundsätze hierfür sind in dem BAW-Merkblatt „Rissbreitenbegrenzung für frühen Zwang in massiven Wasserbauwerken (MFZ)“ dargelegt. Zwangsspannungen und Rissgefahr kann aber auch durch betontechnologische Maßnahmen, nämlich der Reduzierung der Hydratationswärmeentwicklung, begegnet werden. Die Zusammenhänge zwischen Zementart und –gehalt sind hierbei ausreichend bekannt. Allerdings gibt es noch keine Prüfmethode, die zuverlässig und reproduzierbar den Temperaturanstieg im massigen Betonbauteil infolge der Hydratationswärmeentwicklung bestimmen kann.

Dieses Forschungsvorhaben wurde ursprünglich angelegt, um verschiedene Methoden der Hydratationswärmebestimmung zu untersuchen. Wegen der umfangreichen Fragestellung wurde das Forschungsvorhaben in zwei Vorhaben aufgeteilt. Im vorliegenden Vorhaben soll die Prüfung in einem isolierten Block im Feldversuch auf die Durchführbarkeit hin untersucht und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt werden. In dem FuE-Vorhaben 70004 „Messverfahren Hydratationswärme“ werden Laborversuche auf ihre Eignung untersucht. Dieses Forschungsvorhaben war zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Abschlussberichtes noch nicht abgeschlossen.

1.2 Bedeutung für die WSV

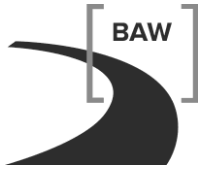
Bedingt durch die vielfach massigen Bauteile im Verkehrswasserbau ist das Thema Hydratationswärmeentwicklung für die WSV von zentraler Bedeutung. Für die Bewertung von Betonsorten hinsichtlich der Hydratationswärmeentwicklung bietet sich die adiabatische Wärmeentwicklung des Betons in den ersten 7 d nach der Wasserzugabe an. Seit 2004 wird der Nachweis der adiabatischen Wärmeentwicklung deshalb in der ZTV-W LB 215 als Abnahmekriterium für Betonsorten für massige Bauteile gefordert. Die Bestimmung kann dabei über Laborversuche oder über eine Baustellenprüfung am isolierten, großformatigen 2m-Block erfolgen. Die WSV benötigt hierfür eine genaue Prüfbeschreibung mit festgelegten und validierten Grenzwerten.

1.3 Untersuchungsziel

Für die Baustellenprüfung der adiabatischen Wärmeentwicklung soll die Prüfung am isolierten, großformatigen 2m-Block optimiert werden. Die Ergebnisse sollen die Prüfbeschreibung in zukünftigen Ausgaben der ZTV-W LB215 präzisieren.

2 Untersuchungsmethoden

Zur Ermittlung der Wärmeentwicklung wurden allseitig isolierte Betonwürfel hergestellt. Die Kubaturen der Würfel betragen $2 \times 2 \times 2 \text{ m}^3$. Im Beton wurden beim Einbau in einem 50 cm-Raster Temperaturmessfühler entlang der Mittelachsen installiert, die den Temperaturverlauf aufzeichneten. Zum Einsatz kommen auch verschiedene Messfühler, um die Genauigkeit der Messfühler untereinander zu verglei-



chen. Parallel werden Temperaturfühlereinstellungen und Messprogramme für das Kalorimeter erprobt.

3 Ergebnisse

Erste Probekörper wurden im Herbst 2004 und in 2009 hergestellt. Der Temperaturverlauf wurde jeweils gemessen und aufgezeichnet. Die Erkenntnisse wurden im Abschlussbericht dokumentiert.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Vorhaben wurde 2012 beendet.

Laufzeit des Vorhabens von 2004 bis 2012.

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

Teil 3: Untersuchungen im Bauteilmaßstab

3 Ergebnisse

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

Teil 2: In Teil 2 des FuE-Vorhabens wurde im Rahmen von Laboruntersuchungen gezeigt, dass Spritzmörtel gemäß ZTV-W LB 219, Abschnitt 5, in einer Schichtstärke von etwa 30 bis 40 mm problemlos mit Textilien bewehrt werden können. Im Altbeton vorhandene Einzelrisse bzw. die Rissbreitenänderungen dieser Einzelrisse können mittels Textilbewehrung auf Basis von AR-Glas oder Carbon in mehrere feinere Risse im applizierten Instandsetzungsmörtel/-beton überführt werden. Die maximale Rissbreitenänderung des Einzelrisses im Altbeton infolge Temperatureinwirkung wurde in den Laboruntersuchungen pessimal zu etwa 0,6 mm (zyklische Veränderung der Rissbreite zwischen 0,1 und 0,7 mm) gewählt.

Teil 3: Die Applizierbarkeit textilbewehrter Spritzmörtelschichten unter Baustellenbedingungen konnte bei der Anlage von Probeflächen am Neckarwehr Horkheim erfolgreich aufgezeigt werden. Die insgesamt acht unterschiedlich ausgebildeten bzw. orientierten Probeflächen wurden mit Messaufnehmern zur Erfassung von Bauteiltemperatur, Rissbreitenänderungen und Dehnungen im Instandsetzungssystem ausgestattet. Nach bislang zweijähriger Beobachtung konnten visuell noch keine Auffälligkeiten oder Risse an diesen frei bewitterten, nicht direkt mit Wasser beaufschlagten Flächen diagnostiziert werden. Die Rissbreitenänderungen im Altbeton haben sich während der Beobachtungszeit allerdings lediglich im Bereich von maximal etwa 0,25 mm bewegt. Als maximale Dehnungen im Spritzmörtel oberhalb von Rissen im Altbeton in Höhe der 1. Spritzlage unter der Textilbewehrung wurden im Beobachtungszeitraum 7,2 mm/m gemessen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012: Das FuE-Vorhaben wurde in 2012 mit der Erstellung eines abschließenden FuE-Berichtes beendet.

Laufzeit des Vorhabens von 2006 bis 2012.

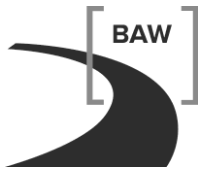
Ausblick: Die Beobachtung der Probeflächen soll über das Ende des FuE-Vorhabens hinaus fortgesetzt werden. In einem künftigen FuE-Vorhaben sollten geeignete Verankerungssysteme für textilbewehrte Spritzmörtelschichten konzipiert werden. Für das Gesamtsystem sollten geeignete Bemessungsansätze erstellt werden, die es dem sachkundigen Planer derartiger Instandsetzungsmaßnahmen ermöglichen, Textilbewehrung und Verankerung in Abhängigkeit bestimmter Randbedingungen zu konzipieren. Des Weiteren sollte untersucht werden, inwieweit auch in Schalung eingebrachte Mörtel oder Betone in Verbindung mit Textilbewehrung Anwendung finden können.

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.

Numerische Modellierung von Bruchvorgängen in Böden

Projekt-Nr.: A39520210084

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

E-Mail: oliver.stelzer@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

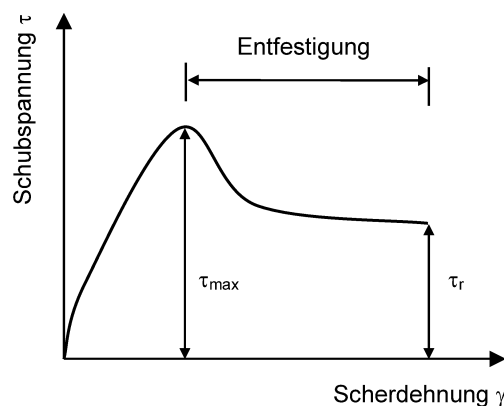


Bild 1: Schubspannungs-Scherdehnungs-Diagramm mit Entfestigungsverhalten

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.

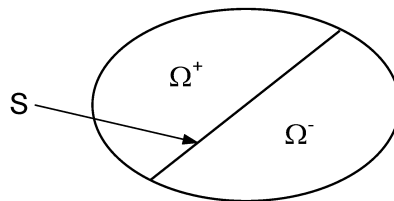


Bild 2: Schematische Darstellung eines durch die Diskontinuität S getrennten Körpers Ω

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).

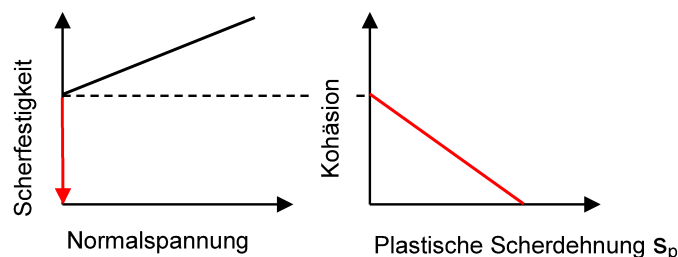


Bild 3: Mohr-Coulombsche Bruchgerade mit linearer Kohäsionsentfestigung

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.

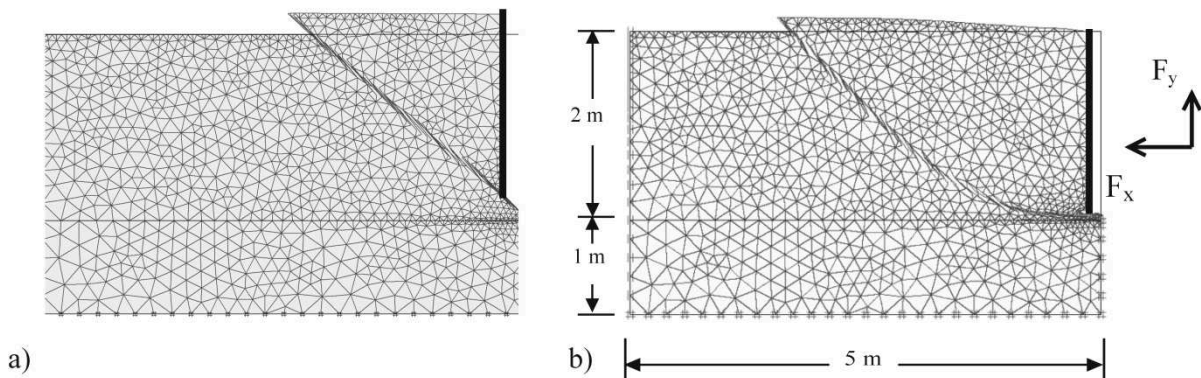


Bild 4: Berechnete Versagensmechanismen für die a) glatte und b) rauhe passive Wand

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

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. Der BAW-Abschlussbericht wurde 2012 erstellt.

Laufzeit des Vorhabens 2003 bis 2012.

Hydraulischer Grundbruch in bindigen Böden

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.

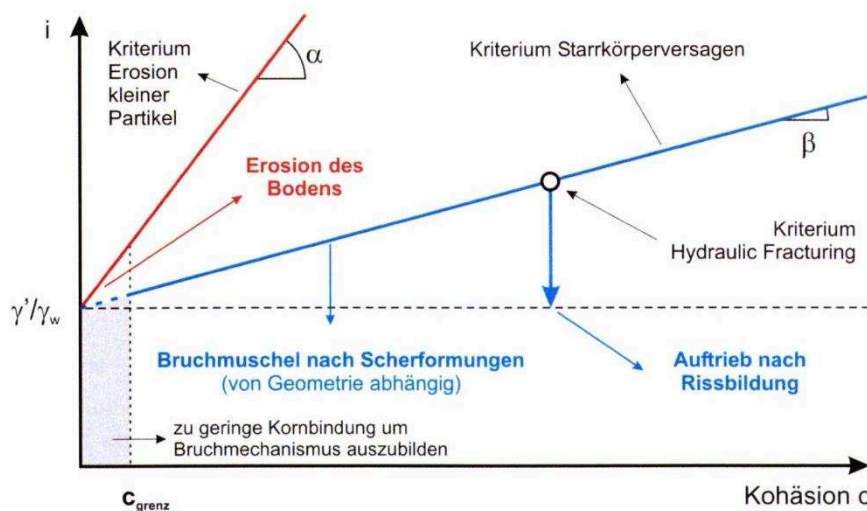


Bild 1: Definition der Versagensformen auf Grundlage von Kohäsion und hydraulischem Gradienten

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 Wassergehalts des Bodens wesentlich für die Beurteilung der Tragfähigkeit des Bodenwiderlagers sind.

Zur Komplettierung der theoretischen Ergebnisse und Ansätze wurden Versuche ausgeführt, um die Zugfestigkeit unterschiedlich bindiger Böden bei ungesättigten und gesättigten Baugrundverhältnissen anhand indirekter und direkter Analyseverfahren zu messen (vgl. Studie „Zugfestigkeit bindiger Böden“). 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 wurde im Dezember 2012 erstellt.

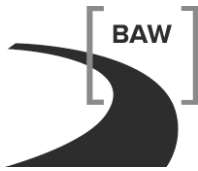
Laufzeit des Vorhabens von 1999 bis 2012.

5 Literatur

-/-

6 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

Setzungen von Sanden bei Schwingungsbelastung

Netzplan-Nr.: A39520570001 (alt: A39560610016)

Projektleiter: Dr.-Ing. U. Zerrenthin, Abteilung Geotechnik, Referat Baugruddynamik (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 (Fleischer, Palloks, 1999).

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 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 fast ausschließlich auf Ergebnissen von Labor- und Modellversuchen. 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 (Palloks, 1999), 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 Laborversuche in Ödometer- und Triaxialzellen durchgeführt. Die dynamischen Wechsellastversuche erfolgten ausschließlich unter ödometrischen Verhältnissen in einem in der BAW entwickelten und gebauten dynamischen Ödometer mit Frequenzen $f = 2$ Hz bis $f = 150$ Hz. Untersucht wurden der Einfluss der Größe der statischen Spannungen, der Größe, Frequenz, Signalform und Anregungsdauer der Wechsellastspannungen, der Zahl der Lastwechsel sowie der Lagerungsdichte und des Ungleichförmigkeitsgrades des Bodens auf die Akkumulation der volumetrischen Dehnung eines Bodenelementes. 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 Setzung des Bodens 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 erhielt die TU Berlin, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, den Auftrag, den Einfluss der Schwingungsanregung durch Baumaßnahmen auf die Standsicherheit von Wasserstraßenseitendämmen mit Hilfe numerischer Verfahren zu untersuchen.

3 Ergebnisse

Die Parameterstudien mit Hilfe der Laborversuche 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 haben dagegen einen vernachlässigbaren Einfluss auf das Volumenänderungsverhalten (Zerrenthin, Jung, 2000). Werden die akkumulierten Volumenänderungen in Abhängigkeit von der Scherdehnung γ dargestellt, so ergeben sich vergleichbare Ergebnisse sowohl aus den Ödometer- und Triaxialversuchen als auch aus den Modellversuchen. Die akkumulierte Dehnung ist dem Quadrat der Scherdehnung proportional. Unterhalb einer Grenzscherdehnung $1 \cdot 10^{-5} < \gamma < 2 \cdot 10^{-5}$ traten bei den untersuchten Sanden bei bis zu $N = 200.000$ Lastzyklen keine messbaren akkumulierten Dehnungen auf. Auch bei den Ankerzugversuchen zeigte sich, dass unterhalb dieser Grenzscherdehnung keine bleibenden Verschiebungen auftreten (Zerrenthin, 2012 a; Zerrenthin 2012 b).

Im Rahmen des beauftragten Forschungsvorhabens der TU-Berlin konnten mit Hilfe von Parameterstudien die wesentlichen Einflussgrößen für das Schwingverhalten eines Dammes herausgearbeitet werden (Röhner, 2006). Aufgrund der notwendigen umfangreichen Entwicklungs- und Programmierarbeiten (Eigengewicht des Dammes, Einzellast im Halbraum und die Verwendung eines nichtlinearen Stoffgesetzes) war es in dem zeitlichen Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht möglich, das gestellte Ziel der Ableitung eines praxistauglichen Bemessungsmodells zu verwirklichen.

Das wesentlichste Ergebnis der Felduntersuchungen ist die nachgewiesene Proportionalität der Setzung des Baugrundes mit der auf der Bodenoberfläche messbaren Schwingungseinwirkung, in die 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 Anzahl der Schwingungen, die Lagerungsdichte und die mittlere Schwinggeschwindigkeit des Bodens. Mit dem entwickelten Prognosemodell (Zerrenthin, 2012 b) konnten die bei allen Feldversuchen gemessenen Setzungen mit relativ geringen Abweichungen dargestellt werden. Setzungen eines Tunnelbauwerkes im Nahbereich von Vibrationsrammarbeiten konnten vor Baubeginn sehr genau prognostiziert werden, wie Messungen nach der Bauausführung bestätigen (Zierach, Zerrenthin, 2009; Zerrenthin, 2010).

Die bei den Labor- und Modellversuchen beobachtete Scherdehnungsgrenze liegt in guter Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Feldmessungen bei Vibrationsrammungen. Damit können entsprechend den jeweils vorliegenden Bodenverhältnissen auch Anhaltswerte der Schwinggeschwindigkeit für den Baugrund angegeben werden, bei deren Unterschreitung schädliche Umlagerungen im Baugrund ausgeschlossen werden können. In der Praxis hat sich gezeigt, dass bei Einhaltung des aus der Scherdehnungsgrenze und der Scherwellengeschwindigkeit ermittelten Anhaltswertes der Bodenschwinggeschwindigkeit die Setzungsbeträge der GOK unter $S = 1$ mm bleiben. Für das Verhalten von Pfahlgründungen bei indirekter Schwingungsanregung besteht weiterer Forschungsbedarf.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Laufzeit des Vorhabens von 1997 bis 2012.

1997 - 2001: Literaturstudie, Labor- und Modellversuche

2002 - 2004: numerische Untersuchungen

2002 - 2009: Feldversuche

2009 - 2012: empirisches Modell zur Setzungsprognose

5 Literatur

Fleischer, P., Palloks, W. (1999): Verformungen einer Dammböschung beim Ziehen von Spundbohlen mit dem Vibrationsbär. BAW-Kolloquium, Setzungen durch Bodenschwingungen, 29.9.1999 Berlin, S. 64-74.

Palloks, W. (1999): Erschütterungen, Setzungen und Verkippungen eines pfahlgegründeten Gebäudes durch Schrägpfahlrammungen bis in den Gründungsbereich. BAW-Kolloquium, Setzungen durch Bodenschwingungen, Berlin 29.09.1999, S. 85-93.

6 Veröffentlichungen

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

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.

Zerrenthin, U. (2010): Setzungen bei Rammarbeiten. Tagungsband BAW-Kolloquium Forschung und Entwicklung im Küstenverkehrswasserbau, 26. und 27. April 2010 in Hamburg.

Zerrenthin, U. (2012 a): Erschütterungen und Setzungen bei Rammarbeiten. In: Johann-Ohde Kolloquium, BAW Mitteilungen Nr. 95, Karlsruhe Juli 2012, S.49-57.

Zerrenthin, U. (2012 b): Setzungen von Sanden bei Schwingungsanregung - Abschlussbericht (Veröffentlichung in Vorbereitung).

Zierach, R., Zerrenthin, U. (2009): Methoden der Baugrunderdynamik im Wasserbau. BAW-Kolloquium, Aktueller Stand und Herausforderungen der Geotechnik im Wasserbau, Karlsruhe 24. September 2009, S. 61-69.

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.

Weitere Anforderungen der WSV an eine automatisierte ASR können in den BAWMitteilungen 96 (BAW, 2012) in dem Beitrag von Hörter (2012) nachgelesen 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).

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.

3 Ergebnisse

Die Ergebnisse des FuE-Vorhabens sind in den BAWMitteilungen 96 (2012) in zahlreichen Artikeln ausführlich dokumentiert. In Arnold et al. (2012) wird der Stand von Wissenschaft und Technik zur ASR erläutert, Schmitt-Heiderich et al. (2012) beschreiben ausführlich den Einfluss der Stellorgane und Schmitt-Heiderich und Gebhardt (2012) den Einfluss der Regelstrecke auf die Abfluss- und Stauzielregelung. Der Einfluss der Messwertfilterung wird von Gebhardt et al. (2012) erläutert. Wohlfart und Gebhardt (2012) beschreiben das Model-Based-Design und die automatische Codegenerierung und zeigen Wege auf, wie die am Rechner entwickelten Algorithmen auf eine Zielplattform (speicherprogrammierbare Steuerung SPS) übertragen werden können.

Durch die Modellierung zahlreicher nicht-linearer Prozesse ist eine Stabilitätsbetrachtung der Regelung nicht möglich. Mit der datenbankgestützten Simulation der möglichen Parameterkombinationen werden stabile Regelungsparameter erhalten (Schmitt-Heiderich und Belzner, 2012). Der Weg von den Voruntersuchungen bis zur Inbetriebnahme einer ASR wird in Gebhardt und Wohlfart (2012) beschrieben.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das FuE-Vorhaben 2012 abgeschlossen (siehe außerdem auch BAWMitteilungen 96. Die Texte dieses Mitteilungsblattes stehen unter http://www.baw.de/de/die_baw/publikationen/mitteilungsblaetter/index.php.html als Download bereit.

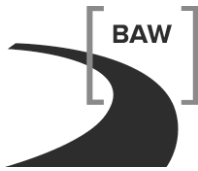
Laufzeit des Vorhabens von 2006 bis 2012.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

- Arnold, E., Schmitt-Heiderich, P., Sawodny, O. (2012): Parametrisierung von Reglern zur automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR) – Stand von Wissenschaft und Technik. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 23-64.
- BAWMitteilungen (2012): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). ISSN 2190-9199; Heft 96; November 2012;
- Gebhardt, M., Schmitt-Heiderich, P., Zhang, B. (2012): Einfluss von Messgrößen auf die Regelgüte und Möglichkeiten zur Filterung relevanter Informationen. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 99-110.
- Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012): Die automatische Regelung einer Stauhaltungskette – Von den Voruntersuchungen bis zur Inbetriebnahme der automatisierten Moselstaustrufen. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 135-144.
- Hörter, P. (2012): Anforderungen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung an die automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 15-22.
- Schmitt-Heiderich, P. (2012): Motivation zum FuE-Vorhaben „Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)“. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 7-14.
- Schmitt-Heiderich, P., Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012): Der Einfluss der Stellorgane auf die Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 65-80.
- Schmitt-Heiderich, P., Gebhardt, M., Wohlfart, S. (2012): Der Einfluss der Stellorgane auf die Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 65-80.
- Schmitt-Heiderich, P., Gebhardt, M. (2012): Der Einfluss der Regelstrecke Stauhaltung auf die Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 81-98.
- Schmitt-Heiderich, P., Belzner, F. (2012): Verfahren zur Parametrisierung von PI-Reglern einer automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 123-134.
- Wohlfart, S., Gebhardt, M. (2012): Automatisierung der Abfluss- und Stauzielregelung durch Model-Based Design und automatische Codegenerierung. In: BAWMitteilungen Nr. 96, 2012, S. 111-122.



Numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlick (MudSim)

Netzplan-Nr.: A39550210093

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

Bearbeiterin: Dipl.-Ing. D. Wehr, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,
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 strömungsberuhten 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 a). Diese Schichten gleicher Dichte, Isopyknen, bilden die vertikale Diskretisierung im Modell. Jeder Isopykne wird ein bestimmtes rheologisches Verhalten (Newtonsches, nicht-Newtonsches Fluid) zugeordnet (siehe Bild 1 b).

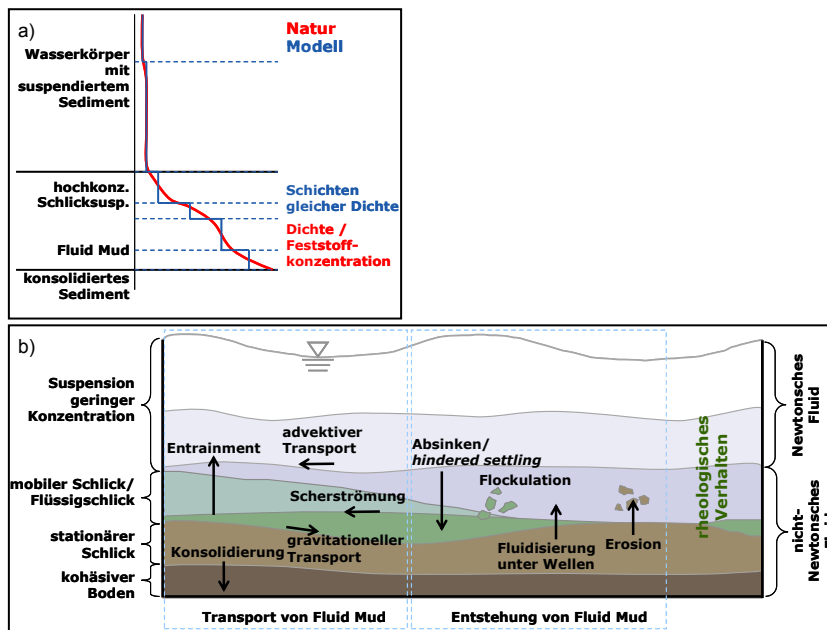


Bild 1: a) Schematische Darstellung der Dichteapproximation, b) Schematische Darstellung der wesentlichen physikalischen Prozesse der Dynamik von Flüssigschlick

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 konzeptionelle 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 Schlicksuspensionen zu erweitern (siehe Bild 1 b).

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 rheologische 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 unterschiedliche Ausschnittsmodelle von Ästuaren angewendet worden, z.B. zur Modellierung von Schlickakkumulationen in Dünentälern der Weser sowie zur Modellierung des Abschnittes Rhede bis Herbrum der Unterems. Der Fluid Mud Transport wird in der letzteren Anwendung 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 2. 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

rheologische Viskosität und das Fließverhalten wird entsprechend träger. In Bild 3 ist die Ebbeströmung dargestellt. Die Strömungsgeschwindigkeit ist bodennah deutlich geringer aufgrund der Flüssigschlickschichten. Der vertikale Geschwindigkeitsgradient an der Lutokline (Schichtgrenze mit sprunghafter Zunahme der Sedimentkonzentration und Feuchtdichte) wird deutlich.

Die Überführung des numerischen Modells in die Programmstruktur der BAW durch Aufbau einer Stand-Alone-Version des MudSim-Modells ist begonnen worden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Weiterentwicklungen des numerischen Modells zur Simulation von Flüssigschlick werden auch nach Beendigung des KFKI-Forschungsprojektes MudSim-B: *Numerische Simulation der Dynamik von Flüssigschlick* (03KIS67) – im Okt. 2010 in der BAW fortgeführt. Das Forschungsprojekt hatte eine Gesamtlaufzeit von Okt. 2010 bis 2012. In einem weiterführenden Projekt wird das numerische Modell in die PrograSeitemmstruktur der BAW integriert und an das Postprocessing der BAW angebunden. In einem weiteren Schritt ist die Kopplung mit dem hydrodynamischen numerischen Modell UnTRIM geplant.

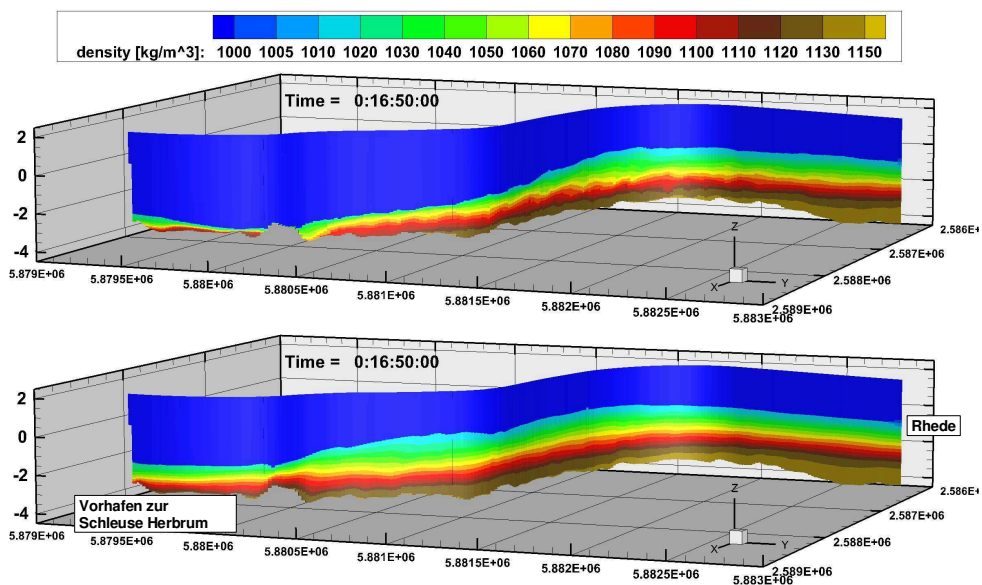


Bild 2: Simulationsergebnisse der Dichteverteilung im Längsprofil in Fahrrinnen Mitte zur Kenterung von Flut zu Ebbe. Obere Graphik zeigt die Simulation mit hohem Oberwasser und untere Graphik mit niedrigem Oberwasser (dreidimensionale Darstellung)

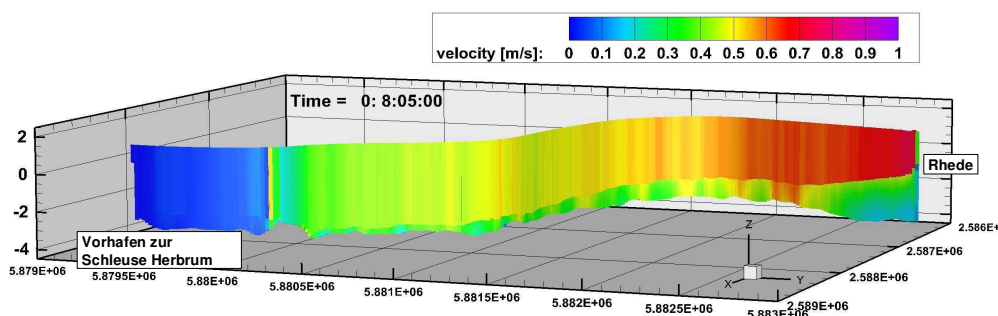


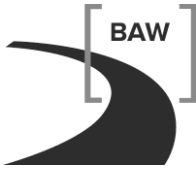
Bild 3: Simulationsergebnisse der Strömungsgeschwindigkeit im Längsprofil in Fahrrinnen Mitte während der Ebbephase (dreidimensionale Darstellung, tiefengemittelte Strömung je Dichteschicht, Klarwasserkörper wird durch eine Dichteschicht abgebildet)

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

- Knoch, D. und Malcherek, A.: A Numerical Model for Simulation of Fluid Mud with different Rheological Behaviors. *Ocean Dynamics*, 61:245-256, 2011.
- Malcherek, A. und Cha, H.: Zur Rheologie von Flüssigschlick: Experimentelle Untersuchungen und theoretische Ansätze. Projektbericht, Mitteilungen des Instituts für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, Heft 111, 2011.
- Wehr, D.: Fluid Mud Studies in the Ems Estuary with an Isopycnal Model Approach., 8th UnTRIM Workshop, 9.-11.Mai, 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
- Wehr, D.: An Isopycnal Numerical Model for the Simulation of Fluid Mud Dynamics. Dissertation, Mitteilungen 115, Institut für Wasserwesen der Universität der Bundeswehr München, 2012. http://www.baw.de/de/die_baw/publikationen/stlk-w_ztv-w/index.html
- Wehr, D.: Simulation of Fluid Mud using MudSim - Future Developments. 9th UnTRIM Workshop, 7.-9. Mai, 2012, Trento, Italien, Vortrag.
- Wehr, D.: Simulation of Fluid Mud Dynamics in the Ems Estuary. The Physics of Estuaries and Coastal Seas (PECS) Symposium, 12.-16.Aug.2012, New York City, USA, Vortrag.
- Wehr, D. und Malcherek A.: Numerical Simulation of Fluid Mud Dynamics – The isopycnal Model MudSim. Veröffentlichung geplant in *Die Küste*, 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. 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 Tidesieg und Tidefall, Asymmetrie der Tidekurve, Flut- oder Ebbestromdominanz sowie Überflutung und Trockenfallen von Wattgebieten hängen davon wesentlich ab.

Eine möglichst präzise Simulation der vorgenannten Phänomene ist damit auch entscheidende Voraussetzung für eine erfolgreiche Simulation der Transporte von Salz, Wärme und Sedimenten. Die Verwendung subgridskaliger Informationen kann daher die Qualität diesbezüglicher Prognoserechnungen für Fragen des Ausbaus- sowie der laufenden Unterhaltung von Seeschiffahrtsstraßen weiter verbessern helfen, ohne den hierfür notwendigen CPU-Aufwand in nicht ökonomisch vertretbarer Weise ansteigen zu lassen.

1.3 Untersuchungsziel

Erprobung verschiedener Strategien bei der Erzeugung subgridskaliger topografischer Daten.
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.

Die Berechnungsergebnisse werden mit in der BAW verfügbaren Methoden weitergehend analysiert und visualisiert.

3 Ergebnisse

1. Dokumentation der Programmierschnittstelle (API) für UnTRIM².
2. Einbinden von UnTRIM² in die BAW-Programmierungsumgebung ProgHome.
3. Umsetzen diverser Strategien zur Generierung von Gitternetzen mit SubGrid in JaNET.
4. 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).
5. Durchführen der Sensitivitätsstudien für den U-Kanal.
6. 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.
7. Durchführen der Sensitivitätsstudien für die unter Punkt 6 erzeugten Gitternetze.
8. Überarbeitung des konzeptionellen Modells zur Berücksichtigung der Bodenreibung in Modellen mit SubGrid in Zusammenarbeit mit Herrn Prof. Casulli, Universität Trient.
9. 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 Topografie 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.
10. Sensitivitätsstudien für die unter Punkt 9 erzeugten Gitternetze. Vergleich der auf unterschiedlichen Gitternetzen erzielten Ergebnisse für die Tidedynamik; siehe auch Bild 2.
11. Erzeugen der Gitternetze (Ausbau-Variante) mit vertiefter Fahrrinne in dem Abschnitt Elbe km 624 – 748 analog zu Punkt 9.
12. Sensitivitätsstudien für die unter Punkt 11 erzeugten Gitternetze. Vergleich der auf unterschiedlichen Gitternetzen erzielten Ergebnisse für die prognostizierten ausbaubedingten Änderungen.
13. 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.
14. http://www.baw.de/methoden/index.php5/Mathematisches_Verfahren_UNTRIM2 : Dokumentation der SubGrid-Technologie im BAWiki.
15. 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.
16. 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.
17. Sensitivitätsstudien für die unter Punkt 16 erzeugten Gitternetze. Vergleich der auf unterschiedlichen Gitternetzen erzielten Ergebnisse für die Tidedynamik.
18. 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.

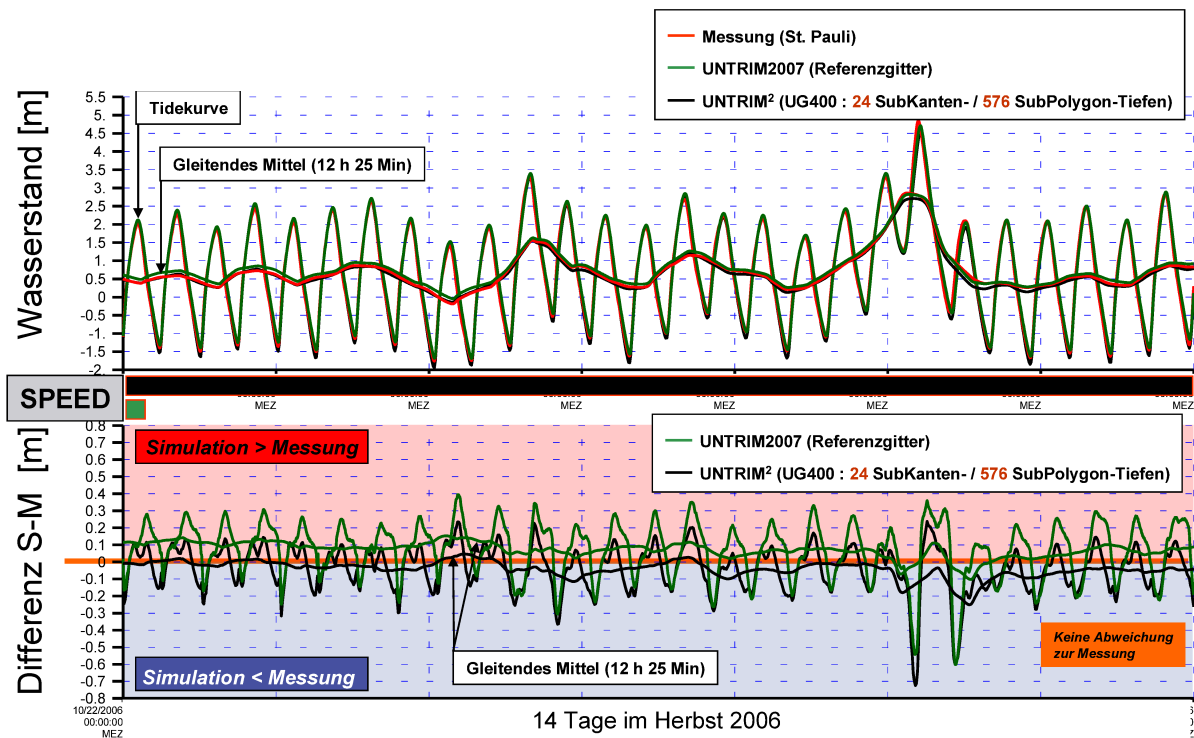


Bild 1: Oben: Wasserstand und gleitendes Mittel (Tidemittel) des Wasserstands am Pegel Hamburg St. Pauli. Messung (Rot), UnTRIM2007 (Grün), UnTRIM² (Schwarz). Unten: Differenz der Tidekurven sowie der tidegemittelten Größen (Simulation minus Messung). UnTRIM2007 (Grün), UnTRIM² (Schwarz). Mitte: relative Fortschrittsgeschwindigkeit der Simulation für UnTRIM2007 (Grün) und UnTRIM² (Schwarz). Nach Rudolph und Kremp (2011), "OPTEL — Operational forecast model for the Elbe Estuary", Vortrag auf dem UnTRIM User Meeting 2011, Folie 42 (modifiziert).

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

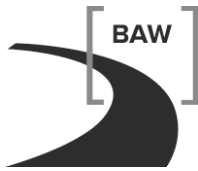
Das FuE-Vorhaben wurde 2012 mit einem Abschlußbericht beendet. Die Themen

1. Konzept zur vollständigen Integration der SubGrid-Technologie im Postprocessing der BAW, sowie die
2. Anforderungsanalyse für die Kopplung mit Seegang und Morphodynamik sollen - wie geplant - in separaten Nachfolge-Projekten bearbeitet werden.

Laufzeit des Vorhabens von 2009 bis 2012.

5 Literatur

- Casulli, V. und 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.



XtremRisk: Simulationen für extreme Sturmflutszenarien in der Tideelbe

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, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, 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 angesehen werden 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, werden jedoch 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 erzeugt um Sturmflutzeitreihen für den Elbmündungsbereich bei Cuxhaven (HH_XR2010A) zu entwickeln. 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 Sturmflutzszenarien 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). Sturmflutzszenario HH_XR2010B ist zusätzlich durch drei aufeinanderfolgende sehr hohe Hochwasser (Kettentide) gekennzeichnet.

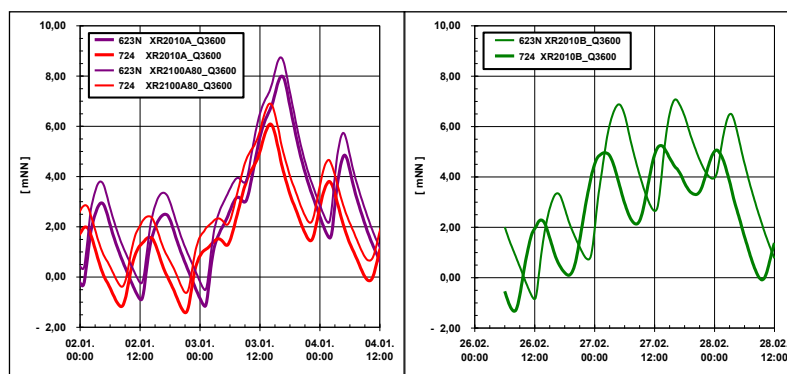
Für diese synthetischen Sturmflutzszenarien wird von der BAW auf der Grundlage der numerischen Modellierung der Wasserstandsverlauf entlang der Elbe bestimmt. Diese Sturmflutwasserstände sind die Eingangsgrößen für weitere Untersuchungen der beteiligten Projektpartner.

2 Untersuchungsmethoden

Durch die Vorgabe von Wasserstandsverläufen in der Elbmündung, der dazugehörigen Windentwicklung über der Elbe sowie der Vorgabe des Oberwasserzuflusses in die Elbe wurden bei der BAW diese synthetischen Sturmflutzszenarien für die Elbe modelliert. 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 Sturmflutcheitelwasserstand HW, Eintrittszeit des Sturmflutcheitelwasserstandes 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 Sturmflutcheitelwasserstände betrachtet. Mit den Wasserstands- und Durchflusszeitreihen aus dem Elbe –Modell der BAW betreibt anschließend der Projektpartner TU Harburg Ausschnittmodelle der Elbe. Der Sturmflutcheitelwasserstand wird von LSBG und fwu für die statistische Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit dieser synthetischen Sturmflut benötigt.

3 Ergebnisse

Für das Sturmflutzszenario HH_XR2010A wird vom LSBG der Wasserstandsverlauf bei Cuxhaven (Bild 1, links rot dick) vorgegeben. Für die Sturmflutzszenarien 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 Sturmflutzszenarien 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 (Elbe km 724) und
Hamburg St. Pauli (Elbe km
623N) für die Sturmflutzszena-
rien 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.

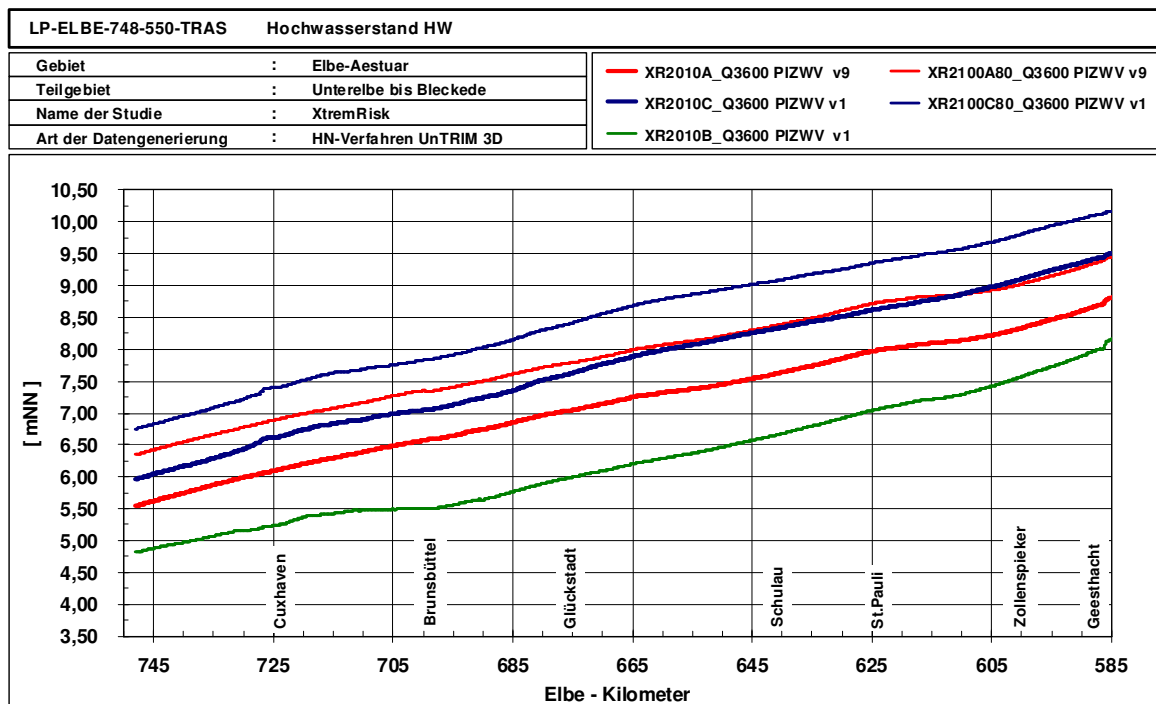


Bild 2: Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe zwischen der Elbmündung bei Cuxhaven und dem Wehr Geesthacht für die Sturmflutszenarien HH_XR2010A (rot, fett), HH_XR2100A80 (rot, dünn), HH_XR2010B (grün), HH_XR2010C (blau, fett), HH_XR2100C80 (blau, dünn).

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

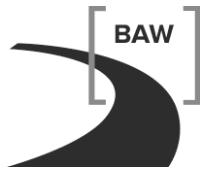
Im Rahmen von XtremRisk hat die BAW insgesamt fünf extreme Sturmflutszenarien modelliert und die Modellergebnisse analysiert. Die Analyseergebnisse wurden den Projektpartnern übergeben. Die Ergebnisse der Sturmflutmodellierung der BAW liegen als Bericht [BAW (2012)] vor. Der Abschlussbericht XtremRisk [Oumeraci et al. (2012)] wurde im Dezember 2012 veröffentlicht, der BAW-FuE-Abschlussbericht wurde fertig gestellt.

Bearbeitungszeitraum XtremRisk: 1. April 2009 bis 2012.

5 Literatur

- BAW (2012). XtremRisk – Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten – Modellierung von Extremsturmflutszenarien im Elbeästuar. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157. 22559 Hamburg.
- BAW (2002). Tideunabhängige Kennwerte des Wasserstandes. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157. 22559 Hamburg. Siehe BAWiki unter: http://www.baw.de/methoden/index.php5/Tideunabh%C3%A4ngige_Kennwerte_des_Wasserstand

- BAW (2004). Validation document – Mathematical – Model UnTRIM. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg, Wedeler Landstraße 157. 22559 Hamburg. Siehe BAWiki unter: 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.
- Oumeraci, H., Gönnert, G., Jensen, J., Kortenhaus, A., Fröhle, P., Gerkenmeier, B., Wahl, T., Mundersbach, C., Naulin, M., Ujeyl, G., Pasche, E., Dassanayake, D.R., Burzel, A. (2012). Extremsturmfluten an offenen Küsten und Ästuargebieten - Risikoermittlung und -beherrschung im Klimawandel (XtremRisk). Abschlussbericht.
Siehe: <https://www.tu-braunschweig.de/lwi/hyku/xtremrisk/results>



II. Laufende FuE-Vorhaben in 2012

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

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. Stilllegungen einerseits und generelle Grundinstandsetzungen andererseits strapazieren unverhältnismäßig Sachmittel- und Personalressourcen der WSV und behindern den Wasserstraßenverkehr. Ein unverhältnismäßiges Versagen von Wasserbauwerken muss dennoch ausgeschlossen sein.

Eine Nachrechnungs-Unterlage nach dem aktuellen Sicherheitskonzept, das die Erkenntnisse aus dem Betrieb und Bestand des Bauwerks (Informationen über die tatsächliche Nutzung, vorhandene Bauwerkseigenschaften, ...) angemessen berücksichtigt, soll das baurechtliche und nachweisrechnerische Defizit beseitigen, eine 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 praxisgerechte, sichere und wirtschaftliche Nachweisführung von bestehenden Wasserbauwerken bei Anwendung des semi-probabilistischen Sicherheitskonzeptes ermöglicht werden und eine a.a.R.d.T. für bestehende Wasserbauwerke erstellt werden.

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

Das Forschungsvorhaben wurde im September 2011 begonnen. In 2012 wurden die Grundlagen des Sicherheitskonzeptes im Bauwesen sowie Regelungen zum Umgang mit bestehender Bausubstanz aufbereitet. Aus Überlegungen wurde das Zuverlässigkeitsniveau für neue Wasserbauwerke zu $\beta = 3,8$ über die geplante Nutzungsdauer $T_N = 100$ Jahre identifiziert. Aus dem Sicherheitskonzept nach DIN EN 1990 lässt sich für bestehende Bauwerke ein restnutzungsdauer-orientiertes Konzept ableiten, das nach schadensfreien Jahren zu modifizierten Zuverlässigkeiten für die Restnutzungsdauern führt, vgl. Bild 1. Untersuchungen zu Modellunsicherheiten, Variationskoeffizienten und Umrechnungsbeiwerten für Beton wurden angestellt. Summarisch lassen sich mit den Zwischen-Ergebnissen bereits Teilsicherheitsbeiwerte vereinfacht modifizieren.

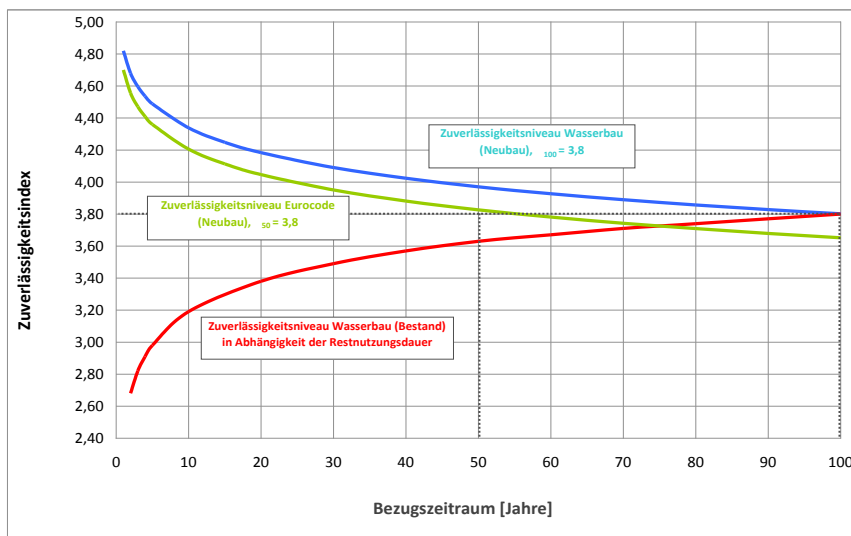


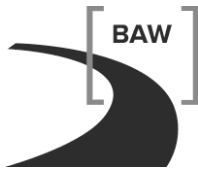
Bild 1: Zuverlässigkeitsindex β über den Bezugszeitraum

Baustoffuntersuchungen an bestehenden, einer normalen Abnutzung unterworfenen (Wasser-)Bauwerken wurden im Rahmen einer Diplomarbeit ausgewertet und lassen den Schluss zu, dass Betone gemäß ihrer Zusammensetzung eine (bekannte) Nacherhärtung erfahren, ihre Feststoffkennwerte keine Degradation zeigen und typische Verhältnisse zwischen Druck- und Zugfestigkeit auch im Alter erhalten bleiben.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013:

- Überlegungen und Analysen zu den für (Verkehrs-)Wasserbauwerke relevanten Verteilungen für Einwirkungen und Widerstände, Datenaufbereitung und -auswertung,
- 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).

Laufzeit des Vorhabens von 09/2011 bis 12/2014.

Entwicklung eines Erhaltungsmanagementsystems für die WSV (EMS-WSV)

Netzplan-Nr.: A39510110139

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

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

Die Bearbeitung zeichnet sich durch eine interdisziplinäre und WSV-weite Arbeitsweise aus (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 Ergebnisse müssen den Belangen der Anwender entsprechen, weshalb enger Kontakt zur WSV gesucht und jedes Zwischenergebnis mit der WSV diskutiert wird.

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

Weiterentwicklungen werden in Kooperation mit Universitäten voran getrieben. Für die Jahre 2013-2015 wird mit einer FuE-Stelle in Kooperation mit der ETH Zürich die Integration von Instandsetzungsmaßnahmen in das EMS-WSV weiterentwickelt.

3 Ergebnisse

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

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

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

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

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

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

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

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

Die Integration von Instandsetzungsmaßnahmen und –kosten bedarf weiterer Grundlagenarbeit, da in der WSV die Instandsetzungen nicht systematisch erfasst werden. Im Rahmen einer Dissertation soll untersucht werden, in welchem Umfang und mit welchem Detaillierungsgrad Instandsetzungsmaßnahmen berücksichtigt werden müssen, um die anstehenden Fragen mit EMS-WSV realistisch beantworten zu können. Das Ergebnis hat Einfluss auf die erforderliche Informationsbereitstellung durch die WSV sowie auf die Verknüpfung mit den Ergebnissen der Zustandsprognose.

Die Prognosemodelle wurde in den Jahren 2011/2012 bei zahlreichen Projekten zur Zustandsprognose von Einzelbauwerken und Bauwerksgruppen bis hin zu Wasserstraßenabschnitten verwendet, siehe beispielsweise Bild 1.

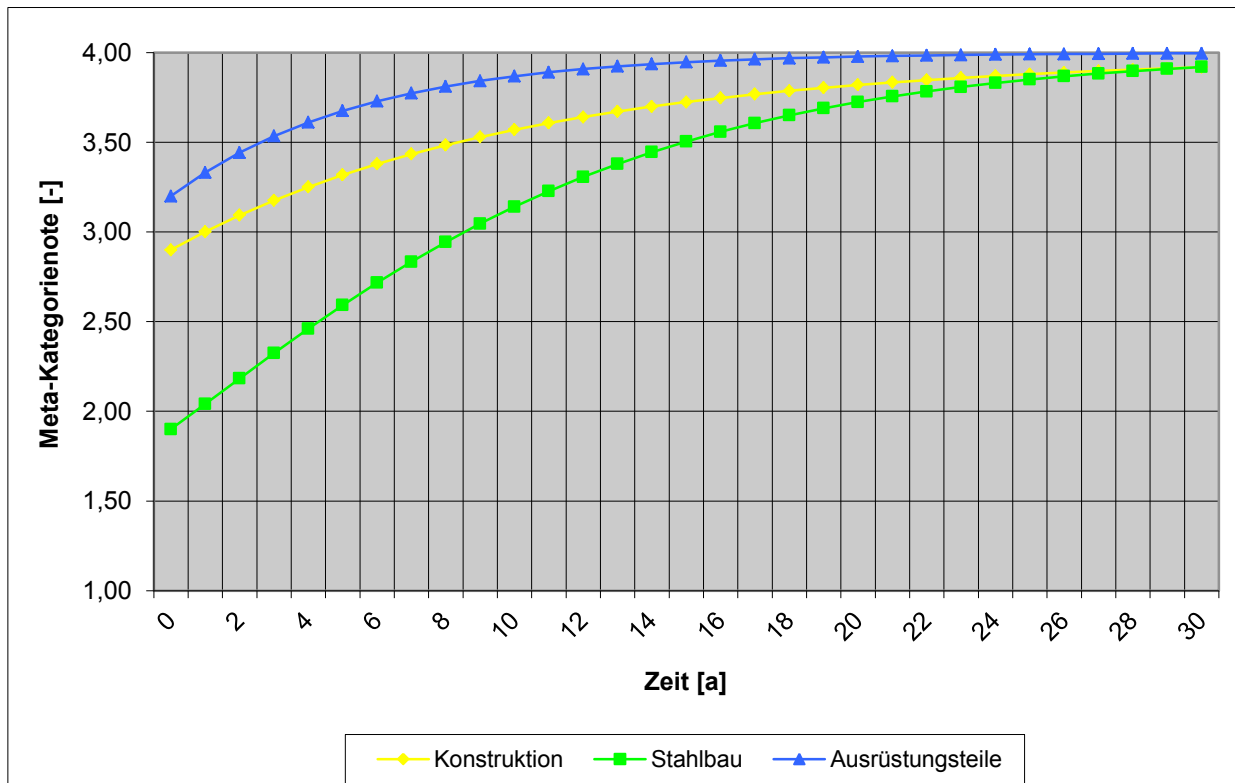


Bild 1: Prognose von drei Teilnoten auf Basis der Inspektionsergebnisse

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013 - 2014:

- Untersuchungen zur Integration weiterer Objekt- und Inspektionsarten in WSVPruf / EMS-WSV
- Untersuchungen zur Integration der Instandsetzungsmaßnahmen in Kooperation mit der ETH Zürich
- Diskussion und Schärfung weiterer Faktoren für die Maßnahmenpriorisierung mit dem BMVBS

2015:

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

Laufzeit des Vorhabens von 2005 bis 2015.

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.

Kloé, K., Bödefeld, J.: Bauwerksinspektion an Verkehrswasserbauwerken. In: Bautechnik 89 (2012), Heft 5, S. 331-332.

Bödefeld, J., Kloé, K.: Managementsystem for infrastructures at waterways. IALCCE 2012, Third International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, Wien, 3.-6.Oktober 2012, Tagungsband

Ermittlung Kräfte bei Ankerwurf auf Kreuzungsbauwerke

Netzplan-Nr.: A39510110178 (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 Ankerwurfverbots oftmals zum Werfen eines Ankers führen. Für Kreuzungsbauwerke unter der Wasserstraße wie z. B. Düker, Tunnel- oder Unterführungsanlagen ergibt sich hieraus ein Gefährdungspotenzial, welches im Schadensfall die Funktionsfähigkeit des Bauwerkes einschränkt (z. B. Volllaufen eines Tunnels mit Wasser) und bei Kanälen ferner zum Leerlaufen einer ganzen Kanalstrecke führen kann.

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

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

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

Die Methoden bestehen aus in situ Messungen sowie theoretischen Ansätzen.

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

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

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

3 Ergebnisse

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

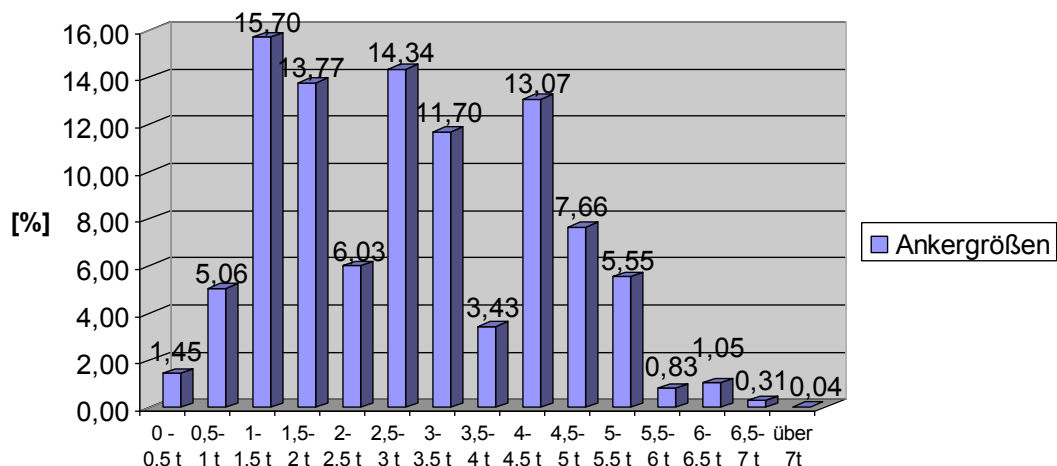


Bild 1: Verteilung der AnkergröÙe auf dem NOK in den Jahren 2004 bis 2006 bei Auswertung von rund 45 % der Schiffspassagen

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, erfolgten schon Planungen zur messtechnischen Untersuchung des Eindringverhaltens und der Kräfteverteilung eines fallenden Ankers in einem entsprechenden Versuchsstand. Aufgrund der Dimensionen eines solchen Versuches muss dieser in einer externen Institution stattfinden, was derzeit allerdings aus Zeit- und Kostengründen zurückgestellt wurde. Da der Zeitpunkt für die Durchführung augenblicklich noch nicht absehbar ist, soll nach Zusammenstellung und Bewertung der bisherigen Ergebnisse das Forschungsvorhaben im Jahr 2013 beendet werden. Zu einem späteren Zeitpunkt soll der Abgleich zwischen realer Eindringssituation und rechnerischer Modellierung ergänzt werden.

Laufzeit des Vorhabens von 2007 bis 2013.

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

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

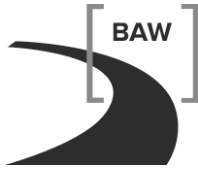
Das Versuchskonzept wurde vom Ingenieurbüro Dr. Schütz Ingenieure aus Kempten aufgestellt, das die Untersuchungen auch fachwissenschaftlich betreut und auswertet. Die eigentlichen Bauteilversuche werden an der Materialprüfanstalt der Technischen Universität München durchgeführt. Die Versuche begannen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



Bild 1: Versuchsstand an der MPA der TUM

Bis Ende 2012 konnten bereits sieben 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 mindestens drei 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 (derzeit noch laufenden) Untersuchungen werden auch die Vergussbereiche freigelegt und untersucht.



4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Durchführung der Bauteilversuche wird voraussichtlich im März 2013 abgeschlossen.

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

Ein Versuch wurde 2012 auch speziell zur Prüfung des Seiltyps gefahren, der in dem oben genannten Bauwerk eingesetzt werden soll.. Dazu erfolgte eine versuchstechnische Simulation der am realen Bauwerk zu erwartenden Beanspruchungen im Seil, die zuvor über rechnerische Untersuchungen an einem räumlichen Tragwerksmodell der Brücke ermittelt wurden. Der Ermüdungs- und Zerreiversuch wurde in Anlehnung an die Vorgaben in DIN EN 1991-1-11 durchgeführt und konnte als bestanden beendet werden. Derzeit läuft das Verfahren zur Beantragung einer Zustimmung im Einzelfall. Die Planungen zur Instandsetzung der Gelmer Brücke sollen dann möglichst umgehend nach Abschluss des Verfahrens begonnen werden.

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

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2014.

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.

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

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

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

Aktuell werden die Erkenntnisse im Rahmen einer dritten Versuchsreihe verifiziert.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Weitere Versuche, Auswertung weiterer Messungen, Berechnungen, Aufstellen des Ingenieurmodells

2014: Berechnungen, Überprüfung des Modells, Auswertung, Zusammenstellung

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2014.

Korrosionsschutz mit Blatt 87 - Untersuchungen zu Zwischenhaftungs- und Farbproblemen

Projekt-Nr.: A39510210309 (ehemals Nr. 8201)
Projektleiter: Dr. G. Binder, R. Baier, Abteilung Bautechnik,
Referat Stahlbau 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 dazugehörigen Prüfbleche mit verfeinerten Untersuchungsverfahren hinsichtlich

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

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

3 Ergebnisse

Durch einen Hersteller wurden Prüftafeln mit zugelassenen Systemen nach Blatt 87 und Blatt 97 („Blatt 88“ stellt dabei eine noch nicht zugelassene, modifizierte Variante von Blatt 87 dar) unter Aufsicht bis zur Zwischenbeschichtung (ZB) im Technikum hergestellt und danach bewittert. Hierbei konnte schon nach zwei Monaten Freilandbewitterung sowohl bei Blatt 87 als auch Blatt 97 eine deutliche Vergilbung der EP-ZB wahrgenommen werden. Das Beschichten der Deckbeschichtung (DB) erfolgte nach zwei bzw. vier Monaten Zwischenbewitterung (Freilandlagerung in Karlsruhe gemäß DIN 55665). Die Auswertung der Blasenbildung nach dem sogenannten ΔT -Test (DIN EN ISO 6270-1) zeigte, dass die Systeme mit Epoxidzwischenbeschichten für Blasenbildung anfällig sind, was den Haftungsproblemen entspricht. Eine Variation der Zwischenreinigung konnten das Problem bei Blatt 87 nicht verhindern! Hingegen waren die Prüfplatten nach „Blatt 88“ frei von jeglichen Anzeichen einer Blasenbildung!

Dies bedeutet, dass das „Blatt 88“ mit einer Zwischenbeschichtung aus PUR, im Unterschied zu den etablierten Systemen der TL/TP-KOR-Stahlbauten (Blatt 87 und 97), keinerlei Beeinträchtigungen aufweist. Auch die Bestimmung der Haftabzugswerte zeigte einen vergleichbaren Trend. Der Salzsprühnebeltest (DIN EN ISO 9227; 2.160 h) zeigte bei allen Serien gute Resultate mit Unterrostungen < 1 mm. Dabei ist anzumerken, dass die Systeme mit lediglich drei Schichten getestet worden sind; üblich sind in der Praxis vier Schichten!

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

Untersuchungen an der Brücke Nr. 474 (Bereich Helmstedt), welche vor sechs Jahren mit dem „Blatt 88“-System beschichtet worden ist, zeigten zufriedenstellende Ergebnisse. Die Haftabzugswerte lagen mit über 7,5 MPa für Baustellenverhältnisse außergewöhnlich hoch. Haftabzugswerte nach Nasspolsterbelastung zeigten grundsätzlich keine Haftverbundstörung zwischen der ZB aus PUR und der farbgebenden DB (niedrigere Werte sind auf sog. Kleberisse zurückzuführen; vergl. Bild 1).

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

Weitere Projekte, in denen Abweichungen zum herkömmlichen Blatt 87 bzw. 97 empfohlen worden ist, wurden von B2 betreut. Es handelt sich dabei um den Aufbau der Gößener Landbrücke und des SHW Niederfinow II. Hierzu wurden erste Testmessungen zur Sicherstellung der Qualität des angelieferten (sensiblen) Gelbtönen im Labor von B2 mittels FTIR-Spektroskopie und Headspace-Gaschromatographie an Nassmustern durchgeführt.

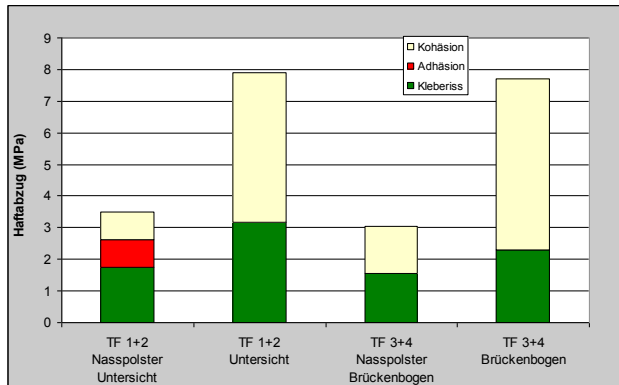


Bild 1: Haftabzugswerte der Brücke 474 (Haldensleben)

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

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

"(1) Bei Korrosionsschutzsystemen nach den Blättern 87 und 97, die teilweise im Werk und teilweise auf der Baustelle appliziert werden, ist es zulässig, die letzte im Werk applizierte Schicht mit einem eisenglimmerhaltigen Polyurethan-Zwischen- bzw. Deckbeschichtungsstoff anstelle des im Anhang A vorgesehenen EP-Zwischenbeschichtungsstoffes entsprechenden Blattes auszuführen."

Bild 2: Textpassage in der zukünftige ZTV-ING 4/3, Abschn. 2. Ziffer (8)

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Labor- und Praxisversuche des Forschungsvorhabens sind soweit abgeschlossen und können zu einem Abschlussbericht zusammengestellt werden. Teile davon sind bereits publiziert.

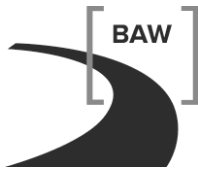
In naher Zukunft werden noch verschiedene Objekte (Haus-Kannener-Brücke Nr. 59, SHW Niederfinow, etc.) betreut bzw. hinsichtlich der Langzeitwirkung des Korrosionsschutzes nach „Blatt 88“ beobachtet und später ausgewertet.

Die Farbabstandsmessungen bei BAW werden zwischenzeitlich weitergeführt, wobei ein neues Farbmessgerät zum Einsatz kommt. Hierbei ist zu prüfen, inwieweit Testreihen nach UV- und Xenon-Test sowie Naturlagerung zu vergleichen sind bzw. voneinander abweichen.

Laufzeit des Vorhabens von 2007 bis 2013.

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

6 Veröffentlichungen

Binder, G. und Baier, R.: Untersuchungen zu Zwischenhaftungsproblemen bei Korrosionsschutzbeschichtungen für den Stahlhochbau; BAW-Brief (2012) Nr. 2

Baier, R. und Binder, G.: Aktuelle Untersuchungsergebnisse zur Zwischenhaftungsproblematik und Folgerungen für Blatt 87 der TL/TP-KOR; Köln, März 2012

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

Die BAW hat den elektrochemischen Schutz der Stahlwasserbauwerke und Uferbefestigungen (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 Edelstahlringen (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)-Isolerring eingebaut. Durch Messung des Wechselstromwiderstands (100 Hz bzw. 1000 Hz) zwischen zwei benachbarten Ringen kann ein Widerstandsprofil über die Einbautiefe des Sensors aufgezeichnet werden. Dabei ist eine Temperaturkompensation der gemessenen Betonwiderstände $[\Omega]$ mit Hilfe der Betontemperatur (gemessen auf Höhe des innersten Rings), eine Umrechnung in spezifische Elektrolytwiderstände $[\Omega \cdot m]$ über die Zellkonstante k möglich. Die hierbei erzielten, zum Teil widersprüchlichen Widerstandsverläufe werden nochmals gezielt überprüft und ggf. im Bereich der Ringelektroden gezielt und kontrolliert mit Wasser, zur Erhöhung von Beton- und Luftfeuchte benetzt. Ferner sollen vergleichende Potentialfeldmessungen von außen vorgenommen werden und deren Verschiebungen gegenüber den Messungen innen, nahe an der schlaffen Bewehrung, verfolgt werden. Auch eine stationäre elektronische Messung von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchtigkeit an insgesamt vier Stellen im Innern der Hohlkästen beginnend im Frühjahr 2013 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 bzw. der tatsächlichen lokalen Schutzwirkung durch die Ermittlung der Ausschaltpotentiale und der dadurch erzielten Depolarisation (> 100 mV) nach DIN EN 12969:2000-06 bestimmt. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl an den diskreten Einzelanoden als auch in dem Bereich der Streckmetallgitteranoden die Ergebnisse auf nahezu optimalen Schutz hinweisen. Die Ausschaltpotentiale lagen dabei in Bereichen von -210 und -450 mV für den östlichen Bereich und bei -150 bis -450 für den westlichen Bereich der Brücke (Messelektrode: MnO_2). Zudem ist festzustellen, dass die Ausschaltpotentiale oberhalb des Grenzpotentials für Spannbetonglieder gemäß DIN EN ISO 12696 und somit auf der sicheren Seite hinsichtlich einer möglichen Wasserstoffversprödung. (s. Bild 2, unten)- Das 100 mV-Funktionskriterium für die gemessene Depolarisation nach 24 Stunden konnte in der Regel ebenfalls (bis auf zwei Ausnahmen; hier spricht der Trend jedoch für ein baldiges Erreichen des Depolarisationskriteriums) für beide Brückenteile erfüllt werden (s. Bild 1). Bei dieser Depolarisierungsmessung besitzen die einzelnen Bezugselektroden einen nach 24 Stunden parallel verschobenen Verlauf; wobei in seltenen Fällen vereinzelte Potentialwerte lokal auseinanderdriften. Die eingestellte Treibspannung (4,45 V) und der davon abzuleitende Schutzstrom konnte dabei beibehalten werden [Bruns, M. & Binder, G., 2013].

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.

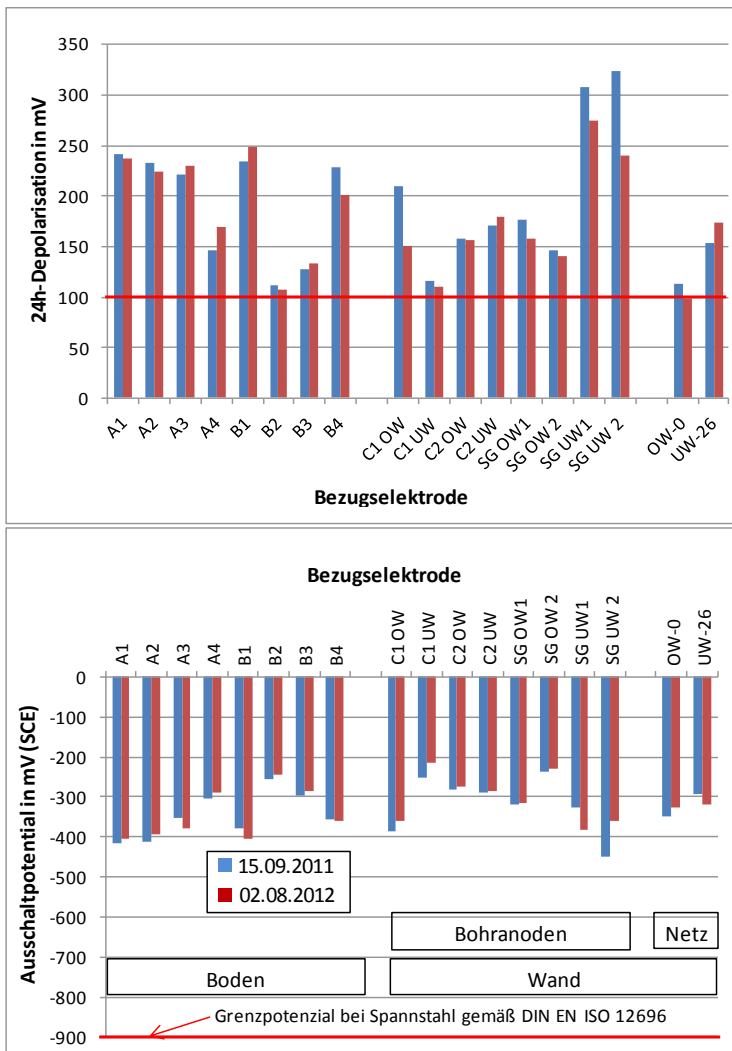


Bild 1: Ergebnis der Ausschaltpotentialmessung (unten) und der Depolarisationsmessungen (oben) am 15.09.2011 sowie knapp ein Jahr später am 02.08.2012 an den eingebauten Bezugselektroden im östlichen Hohlkasten

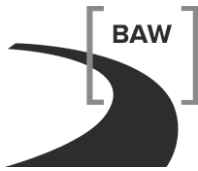
4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 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)
- Anbringung von Sensoren zur Bestimmung der Raumklimata in den Hohlkästen
- Messwertverfolgung nach künstlicher Anhebung der Betonfeuchte durch Rehydratisierung nach Wasserbeaufschlagung (2013-2014).

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2014.

5 Literatur

-/-



6 Veröffentlichungen

Bruns, M. und Binder, G.: Umsetzung des Kathodischen Korrosionsschutzes an den Spannbetonüberbauten der Schleusenbrücke Iffezheim; Beton- und Stahlbetonbau, 108 (2013) 2 (11 Seiten, in Druck)

Korrosionseigenschaften von Spundwandstählen

Netzplan-Nr.: A39510270003

Projektleiter: J. Ruppert, Abteilung 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 und zur Probevorbereitung. Ergänzt wurde die Korrosionsmesszelle durch ein Zusatzgerät (LM 2000) zur Online-Bestimmung verschiedener Wasserparameter (pH-Wert, Sauerstoffgehalt, Temperatur) und mit einem Thermostaten um bei konstanten Temperaturen von 10-40°C arbeiten zu können.

Zusätzlich wurde ein Rührer mit digitaler Anzeige der Umdrehungsgeschwindigkeit (rpm) installiert. Somit wurden reproduzierbare Bedingungen geschaffen.

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.

Insgesamt wurden inzwischen weit über 100 Versuche mit der KMZ durchgeführt. Hierbei wurde untersucht ob die Messzelle Temperaturunterschiede erfassen kann. Hierbei zeigte sich mit steigender Temperatur ein erwarteter exponentieller Anstieg der Korrosionsgeschwindigkeit. Ein Beispiel hierfür ist in Bild 1 aufgezeigt.

Weiterhin wurden Testreihen zum Einfluss der Rührgeschwindigkeit durchgeführt. Hierbei ließ sich kein eindeutiger Trend feststellen. Möglicherweise lässt sich Sulfat aufgrund seiner Größe mehr beeinflussen als Chlorid. Dies muss in weiteren Versuchen untersucht werden. Die Sauerstoffkonzentration zeigte keine Unterschiede bei den verschiedenen Rührgeschwindigkeiten.

Ein weiterer Schwerpunkt war, die Aggressivität der verschiedenen Anionen und Kationen in Modellösungen zu vergleichen. Bei den Anionen zeigte sich, dass Sulfat (SO_4^{2-}) wesentlich aggressiver zu sein scheint als Chlorid (Cl^-) bei gleichen Gegenionen. Bromid (Br^-) ließ sich nicht eindeutig einordnen und Modellösungen mit Carbonat (CO_3^{2-}) wirkten inhibierend.

Bei den Kationen wirkte Kalium (K^+) aggressiver als Natrium (Na^+) bei entsprechenden Gegenionen. Dies lässt sich durch deren kleinere Hydrathülle, und damit ihrer besseren Beweglichkeit, erklären.

Um z. B. Versuche mit Chlorid und mit Sulfat vergleichen zu können, wurde bei den Modellösungen nicht dieselbe Konzentration der Lösung verwendet sondern dieselbe Ionenstärke.

Der Einfluss des pH-Wertes wurde ebenfalls untersucht und hierbei ergab sich eine erhöhte Aggressivität im sauren gegenüber Versuchen im basischen Milieu was so zu erwarten war.

Als Standardversuchsbedingungen bei allen Versuchen wurde sich an die American Society for Testing and Materials (ASTM G5 – 94(2011)e1) angelehnt.

Parallel dazu wurden Langzeitversuche von Baustahlproben (S235) in unterschiedlichen Konzentrationen von Modellösungen (NaCl ; Na_2SO_4 ; NaBr) einen bzw. vier Monate durchgeführt und ausgewertet. Die gebildeten Rostphasen wurden mittels FTIR und die Konzentration des gelösten Eisens in den Modellösungen mittels AAS analysiert. Es kristallisierte in allen Lösungen, trotz der teils hohen Chloridkonzentrationen Lepidokrokit ($\gamma\text{-FeOOH}$) und Magnetit aus, aber kein Akaganeit ($\beta\text{-FeOOH}$) welcher sich bei hohen Chloridkonzentrationen, allerdings nur im sauren Milieu, bilden kann (U. Schwertmann, R. M. Cornell, 2000). Auffällig waren nur die gebildeten Rostphasen bei den Proben im Karlsruher Trinkwasser (KATW), welche sich durch den hohen Kalkgehalt im KATW erklären lassen.

Bei der Gewichtsabnahme der Proben nach vier Monaten in den verschiedenen Immersionsmedien ließen sich keine augenscheinliche Unterschiede finden.

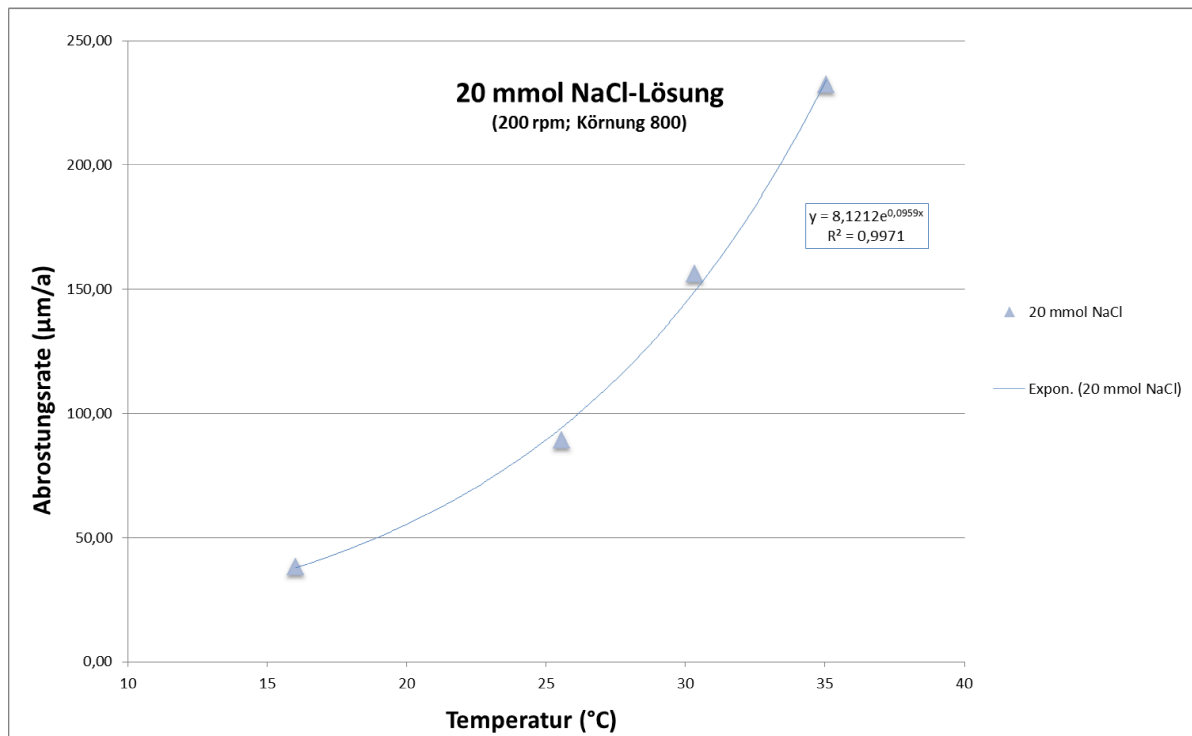


Bild 1: Abrostungsraten von Baustahl (S235) in 20mmol NaCl-Lösungen bei verschiedenen Temperaturen

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Sichtung vorhandener und relevanter Untersuchungen und Veröffentlichungen.

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. Diese Ergebnisse sollen dann mit Messwerten an Bauwerken verglichen werden (2013 bis Ende 2014).

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2014.

5 Literatur

ASTM G5 – 94(2011)e1

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.

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 Unter-

suchungen liegt auf der Bestimmung von Festigkeiten, Porenstruktur und Frostwiderstand der einbezogenen 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 Bohrkern entnommen worden, die in der BAW untersucht wurden. In 2001 und 2002 sind in der BAW umfangreiche Untersuchungen an gesondert hergestellten, verkehrswasserbautypischen Betonen sowie an Betonen nach EN 206 durchgeführt worden. In den Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein wurden in 2003 gemeinsam mit der RWTH Aachen und der Fa. CEMEX Betonprobekörper ausgelagert, welche unter Verwendung von CEM III/A hergestellt worden sind. In 2009 wurde im Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ein Fertigteil aus dem Projekt Instandsetzung Schleusen Üfingen/Wedtlienstedt 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 auf verschiedenen Tagungen vorgestellt:

- im März 2009 auf dem 6. Symposium "Baustoffe und Bauwerkserhaltung" in Karlsruhe
- im September 2009 auf der 17. Internationalen Baustofftagung ibausil in Weimar
- im Januar 2010 im Rahmen eines Frostkolloquiums in Berlin, gemeinsam veranstaltet von DAfStb, BAST und BAW
- im März 2010 auf dem 39. Aachener Baustofftag
- im April 2010 auf dem BAW-Kolloquium "Forschung und Entwicklung im Küstenwasserbau" in Hamburg

- im Juli 2010 auf der VDB Regionalgruppentagung in Rheinfelden
- im Juli 2012 auf dem 9th fib International PhD Symposium in Civil Engineering in Karlsruhe

Danach sind jahreszeitliche Schwankungen des Sättigungsgrades in den Expositionen unter mäßiger Sättigung (XF1) wesentlich stärker ausgeprägt als unter hoher Sättigung (XF3). Hohe Sättigungsgrade treten in den Expositionsklassen XF1 und XF2 als seltene Spitzenwerte auf, an die sich in der Regel eine Trocknungsphase anschließt. Bei Bauteilen mit ständigem oder periodischem Wasserkontakt wie beispielsweise Schleusen lag der Sättigungsgrad des Randbereiches in der Wasserwechselzone hingegen weitgehend konstant und entsprach etwa der betonspezifischen Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck. Derart hohe Wassersättigungsgrade in Verbindung mit ausgeprägten Temperaturänderungen infolge betriebsbedingter Wasserstandsänderungen führen bei Verkehrswasserbauwerken zu Frostbeanspruchungen, die für deutsche Gegebenheiten dem pessimalen Bereich zuzuordnen sind.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen einer Dissertation verarbeitet, welche als Heft 604 des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton veröffentlicht ist.

Zur Erfassung einer XF3-Beanspruchung an horizontalen Flächen wurde in 2012 eine Betonplatte, hergestellt und analog zu den Bauwerksmessungen mit Temperatursensoren und Multiringensensoren ausgestattet. Die Platte lagert derzeit auf dem Gelände der BAW und wird im Herbst 2013 im Nahbereich der Sparbecken der Schleuse Hilpoltstein ausgelagert.

Teil III:

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

Teile I bis III:

Die 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 2013 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 wird 2013 an der Schleuse Hilpoltstein ausgelagert werden.

Zeitplan:

Der Abschluss des Gesamtvorhabens und die Erstellung des FuE-Berichtes werden im Jahr 2013 erfolgen. Die über 2013 hinausgehenden Aktivitäten (längerfristige Beobachtungen der ausgelagerten Prüfkörper, des Fertigteils und der horizontalen XF3-Platte sowie die Datenaufzeichnungen an den Schleusen Hohenwarthe und Hilpoltstein) werden im Rahmen eines Folgevorhabens durchgeführt. Laufzeit des Vorhabens von 1999 bis 2014.

Instandsetzungssysteme für alte Wasserbauwerke

Netzplan-Nr.: A39510310127

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

E-Mail: thorsten.reschke@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

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

Die Entwicklung neuer Instandsetzungssysteme hat in den letzten Jahren aufgrund der intensiven Materialentwicklung einiger Hersteller große Fortschritte gemacht. Einerseits wurden schnell erhärtende Systeme entwickelt, deren Eignung z. T. bereits an Wasserbauwerken überprüft 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 dünn-schichtiger Vorsatzschalen grundsätzlich möglich wird.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

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

1.3 Untersuchungsziel

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

¹ Probeinstandsetzung Schleuse Feudenheim 2002/2003

² Feldversuch der IMF AG/ StoCretec GmbH an der Schwarzatalsperrre 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.

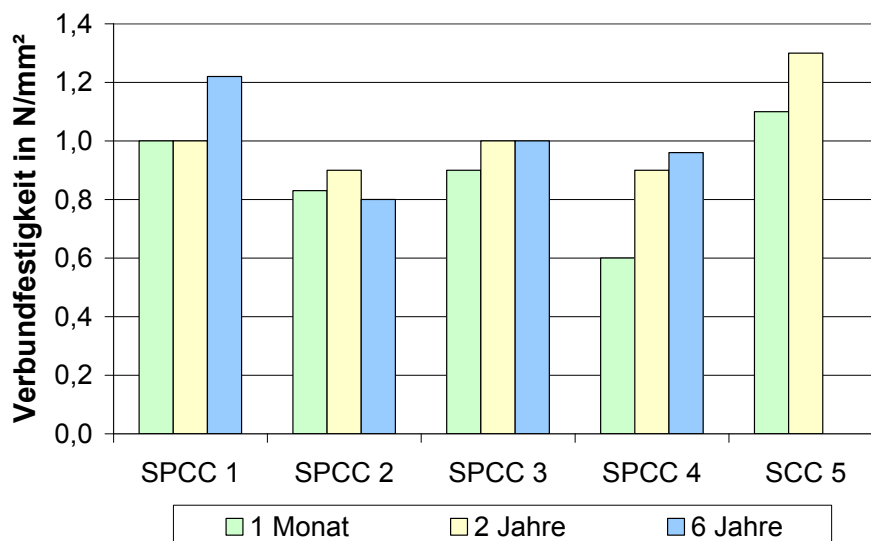


Bild 1: Entwicklung der Verbundfestigkeiten

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

2013:

- Die bestehenden Versuchsflächen mit den SPCC-Systemen werden abschließend beprobt und bewertet. Bei Bedarf werden Anpassungen für das BAW-Merkblatt MSM erarbeitet.
- Es ist geplant, auf die noch freie Versuchsfläche (Stampfbetonwand) ein schnell erhärtendes Instandsetzungssystem (SCC) in Verbindung mit einer textilen Bewehrung zu applizieren. Diese Instandsetzungsvariante wurde insbesondere für Instandsetzungen „unter Betrieb“ konzipiert.

2014-2015:

- Die beiden Versuchsflächen mit den schnell erhärtenden Instandsetzungssystemen (SCC) werden vergleichend beobachtet und regelmäßig beprobt. Im Jahr 2015 erfolgt eine abschließende Bewertung.
Bei entsprechender Eignung soll das textilbewehrte System dann an Bauwerksteilen von Wasserbauwerken getestet werden.

Laufzeit des Vorhabens von 2003 bis 2015.

Injektion Vorsatzschale

Netzplan-Nr.: A39510310234

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

E-Mail: hilmar.mueller@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

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

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

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

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

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

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

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

3 Ergebnisse 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.

Laufzeit des Vorhabens von 2006 bis 2013.

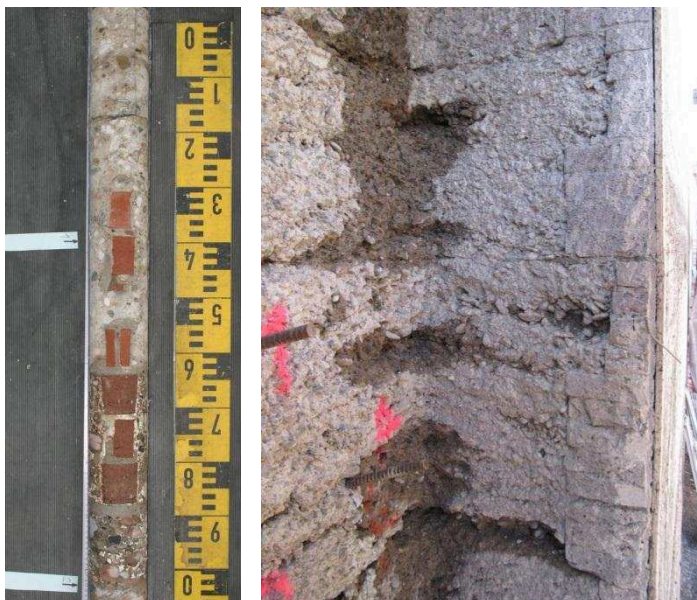


Bild 1: Injizierter Bohrkern (links), Verbund Vorsatzschale-Kernbeton (rechts)

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 2013 vorliegen.

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 zumeist nicht ausreichend bzw. mangels entsprechender Informationen zu den Baustoffen nicht anwendbar, praxisgeeignete Bemessungsverfahren auf probabilistischer Basis stehen nicht zur Verfügung.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

Es sind Bemessungskonzepte zu erarbeiten, die bei gegebenen Betoneigenschaften eine realistische Bewertung der 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. Anhand der Ergebnisse der Analysen wurden in 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.

Für die Lebensdauerprognose von instandgesetzten Bauteilen fehlen noch die Beschreibung und die mathematische Formulierung des Chloridtransports im 2-Schicht-System bestehend aus dem alten Beton und dem Instandsetzungsmaterial. Um dennoch eine schätzungsweise Beurteilung ihrer Restnutzungsdauer vorzunehmen, wurden in einem ersten Ansatz Zuverlässigkeitsanalysen anhand eines vereinfachten Transportmodells und unter Vernachlässigung von Umverteilung der Restchloride in der Altbetonschicht durchgeführt. Bild 1 zeigt exemplarisch die so berechneten Restnutzungsdauer mit der Variation der Parameter: Dicke der Altbetonschicht, Dicke der neuen Schicht und Restchloridgehalt

an der Bewehrungsfläche vor der Instandsetzung für einen angestrebten Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 1,5$.

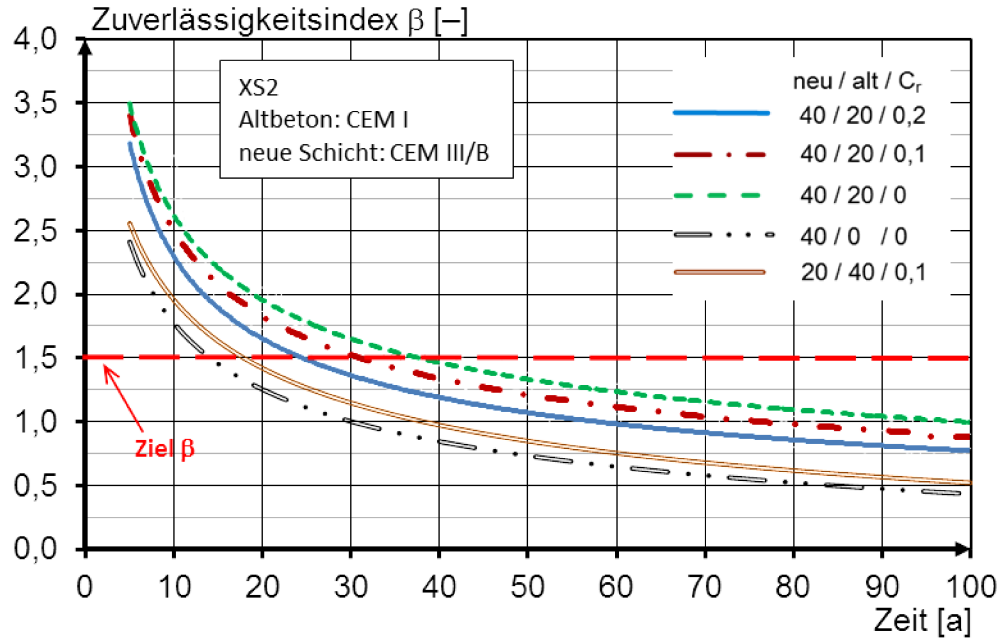


Bild 1: Abgeschätzte Restnutzungsdauer nach der Instandsetzung – Einfluss der Dicke der verbleibenden Altbeton- und der neuen Instandsetzungsschicht (in mm) sowie Einfluss des Restchloridgehalts an der Bewehrungsfläche vor der Instandsetzung (C_r in M.-%/z); ohne Berücksichtigung der Umverteilung der Restchloride im Altbeton

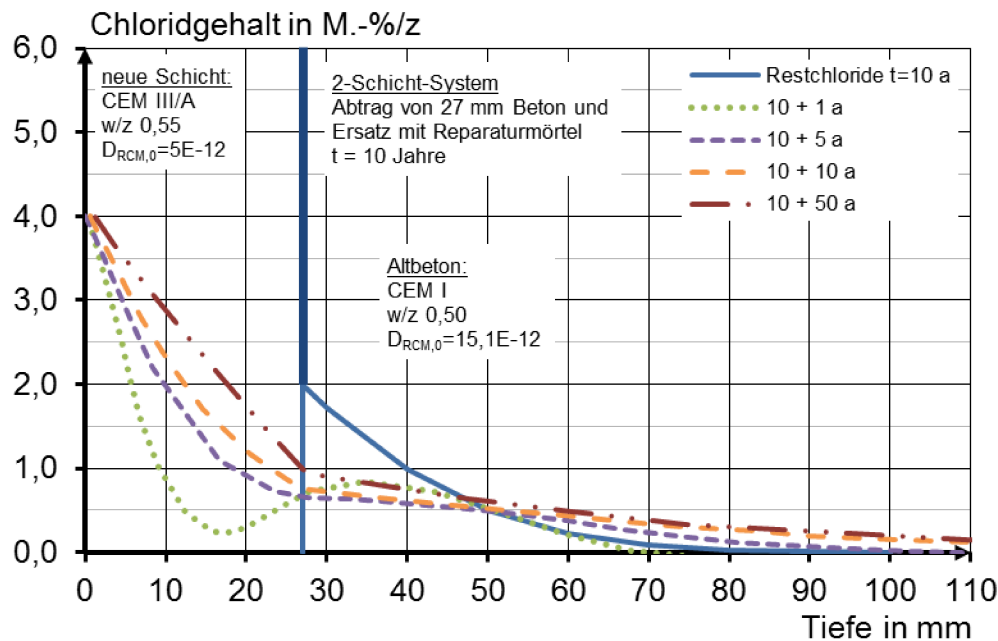


Bild 2: Numerische Ermittlung des Eindringens und der Umverteilung der Chloriden in einem instandgesetzten Bauteil mit Hilfe der FEM

In einem weiteren Schritt wurde den Chloriddiffusion in einem 2-Schicht-System unter Berücksichtigung der Umverteilung der Restchloride mit Hilfe der Finite Elemente Methode numerisch untersucht. Bild 2 zeigt exemplarisch den Verlauf des Chlorideindringens und der -umverteilung in einem 2-

Schicht-System (Instandsetzung nach 10 Jahren XS3-Exposition) nach 1, 5, 10 und 50 Jahren. Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt von 0,5 M.-%/z erreicht die Bewehrungsoberfläche in einer Tiefe von 60 mm nach etwa 50 Jahren nach der Instandsetzung (Mittelwerte, $\beta = 0$).

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die aktuellen Forschungsaktivitäten zur Erarbeitung der Bemessungskonzepte wurden im September 2011 begonnen. Die ersten Analysen für die Neubaumaßnahmen wurden bereits im Jahr 2011 durchgeführt. Mit den Untersuchungen im Bereich bestehender Bauwerke, welche systematische Laborversuche und Bauwerksanalysen sowie numerische Berechnungen beinhalten, wurden im Jahr 2012 begonnen. Die Laufzeit des Vorhabens ist bis Mitte 2015 veranschlagt.

Laufzeit des Vorhabens von 2006 bis 2015.

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 wurde zwischenzeitlich bei CEN und ISO Ebene genormt (DIN EN ISO 10772). Im Rahmen der Normungsarbeit wurden Fragen zur Versuchsmethodik und Prüfeinrichtung aufgeworfen, die im Rahmen des Forschungsvorhabens in Zusammenarbeit mit anderen europäischen Institutionen wie Rijkswaterstaat (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.

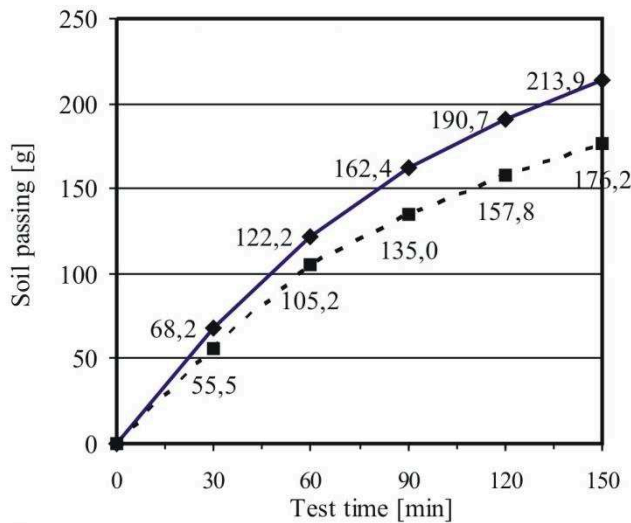


Bild 1: Bodendurchgang (soil passing) vor und nach Abriebbeanspruchung

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: 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.

2014: Es soll eine Versuchszelle für Turbulenzversuche an Proben im gedehnten Zustand konzipiert werden.

Laufzeit des Vorhabens von 2008 bis 2013.

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

E-Mail: frank.spoerel@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

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

Die Dauerhaftigkeit eines Bauteils wird aber nicht allein durch die Dauerhaftigkeit des Betons an sich, sondern auch durch Anzahl und Breite etwaiger Risse beeinflusst. Risse entstehen bei massigen Bauteilen, wie sie im Wasserbau der Regelfall sind, insbesondere im jungen Alter durch (frühen) Zwang infolge Hydratationswärme. Beim Bau solcher Bauteile müssen deshalb Anstrengungen unternommen werden, derartige Zwangsspannungen von vornherein möglichst gering zu halten. Aus betontechnologischer Sicht sind zur Reduzierung von Zwangsspannungen aus Hydratationswärme vorrangig die Frischbetontemperatur und die adiabatische Temperaturentwicklung des Betons niedrig zu halten. Teil 2 der ZTV-W LB 215 enthält diesbezüglich für massive Bauteile (kleinste Abmessung > 0,80 m) entsprechende Anforderungen. Maßgebliche Parameter für die adiabatische Temperaturentwicklung eines Betons im jungen Alter sind Zementart und Zementgehalt.

Die betontechnologischen Anforderungen hinsichtlich der Dauerhaftigkeit des Betons an sich und der Minimierung der Hydratationswärmeentwicklung u. a. hinsichtlich Bindemittelart und Bindemittelgehalt sind jedoch häufig gegenläufig. Das Fenster, welches dem Betontechnologen derzeit für die Betonkonzeption zur Verfügung steht, ist bei bestimmten Expositionsklassen vergleichsweise klein. Dies betrifft insbesondere massive Bauteile, die eine intensive Frostbeanspruchung erfahren (XF3, XF4).

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen dieses FuE-Vorhabens soll der Frage nachgegangen werden, ob und ggf. inwieweit bei Betonen für massige Bauteile von Wasserbauwerken eine Reduzierung des Zementgehaltes als wesentlichem Parameter für die Hydratationswärmeentwicklung unter die Anforderungen der DIN 1045-2 (2001) bei gleichzeitiger Sicherstellung der erforderlichen Dauerhaftigkeitseigenschaften für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren zulässig ist.

Die Zulässigkeit der Normabweichungen und deren Grenzen sollen durch geeignete Ansätze (theoretische Überlegungen, Nachweis der Gleichwertigkeit durch Performance-Ansätze) aufgezeigt werden.

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

2 Untersuchungsmethoden

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. In 2012 erfolgte aufgrund anderer Prioritäten keine Bearbeitung.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013-2014: Darstellung des Sachstands, Erstellung und Umsetzung des Bearbeitungskonzeptes

Laufzeit des Vorhabens von 2008 bis 2014.

Messverfahren Hydratationswärme

Netzplan-Nr.: A39510370004

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

E-Mail: frank.spoerel@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Entwicklung der Hydratationswärme im Beton ist zur Erfassung der daraus resultierenden Zwangsspannungen insbesondere in massigen Bauteilen von Bedeutung. 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 Prüfmethoden ermittelten Temperaturerhöhungen wird verbessert. Ausgangsstoffuntersuchungen zur Optimierung der Freisetzung von Hydratationswärme könnten bei Eignung der Verfahren im Vorfeld von Baumaßnahmen mit deutlich reduziertem Aufwand durchgeführt werden, um eine Optimierung der Betonzusammensetzung in Bezug auf die Hydratationswärmeentwicklung zu erreichen.

1.3 Untersuchungsziel

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

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 fünf 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.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013-2014: Zur Absicherung der Erkenntnisse sind weitere Untersuchungsreihen geplant. Begleitend zu jeweils in der BAW durchgeführten Kontrollprüfungen werden die gleichen Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen den beschriebenen Prüfungen unterzogen. Nach Vorliegen einer ausreichenden Anzahl an Prüfergebnissen folgen eine zusammenfassende Bewertung der einzelnen Prüfmethoden. Es folgt ein Ausblick auf die Anwendungsmöglichkeiten rechnerischer Verfahren zur Bestimmung der quasiadiabatischen Temperaturerhöhung. Eine Zusammenarbeit mit verschiedenen Forschungseinrichtungen soll die zukünftige Vorgehensweise absichern. Weiterhin werden fortlaufende Untersuchungen aus dem beendeten Projekt A39510310177 „Adiabatische Wärmemessungen an ausgewählten Betonrezepturen“ sowie die Entwicklung und der Bau eines neuen adiabatischen Betonkalorimeters in das Projekt mit aufgenommen.

Laufzeit des Vorhabens von 2008 bis 2014.

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

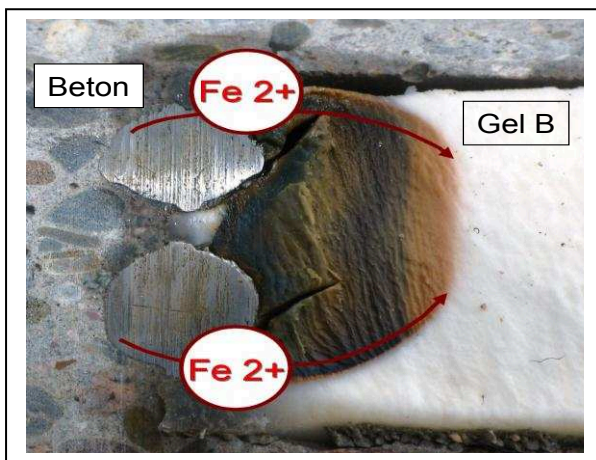


Bild 1: Bohrkerne, Gel B und Korrosionsspuren im Gel

Bei Gel A wurden dagegen erst nach 15monatiger Lagerung Korrosionsspuren in 18 mm Tiefe festgestellt. Anhand der Bohrkernentnahmen wurde eine Wechselreaktion von Acrylatgelen mit den Dichtelementen „beschichtete Fugenbleche“ und „Fugenbänder“ festgestellt. Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass alle drei Gele als korrosionsfördernd bzw. als Korrosionsverursacher einzuschätzen sind. Acrylatgele werden als Alternative für die Füllung von Hohlräumen wie Kiesnestern 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.

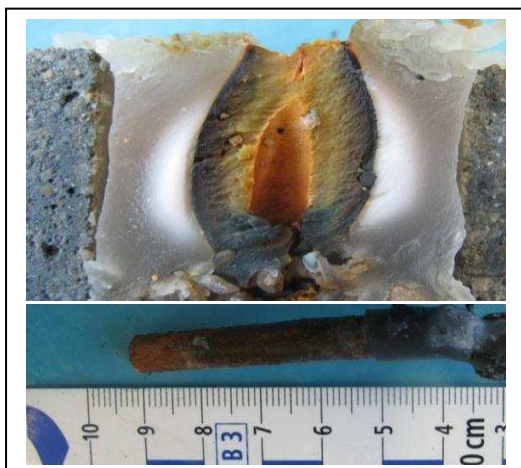


Bild 2: Lollipop-Probekörper künstliches Kiesnest Gel B (oben) und gerostete Arbeitselektrode (unten).

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 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.

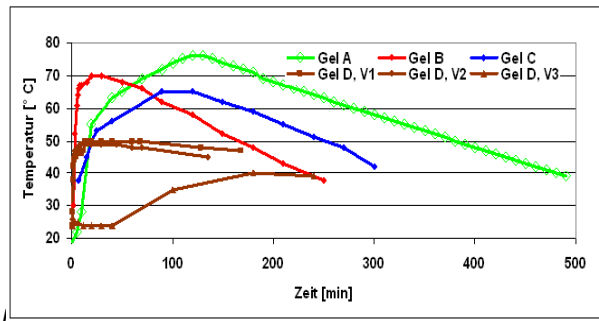


Bild 3: Temperaturanstieg bei der Aushärtung der Gele bei Anmischvolumina von ca. 10 bis 13 l

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

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2013: Für die Gele C und D sollen in Anlehnung an die bisherigen Untersuchungen Betonmodelle hergestellt werden. Ferner sollen die Materialeigenschaften eines quellfähigen Vliesstoffes untersucht werden. Es soll festgestellt werden, ob der Quellvorgang des Polymeres mit der Gelbildung vergleichbar ist. Es sollen auch noch Untersuchungen mit Granulaten bzw. Pulver aus bereits polymerisiertem quellfähigem Polyacrylat durchgeführt werden. Eine Umweltgefährdung durch nicht ausreagierte Ausgangsstoffe wäre dann auszuschließen.
- 2014: 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.

Laufzeit des Vorhabens von 2008 bis 2014.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

Maisner, M.; Eßer, A.; Kwenjeu, A.; Westendarp, A.; Schnellenbach-Held, M.: Quellfähige Acrylat-gele – Eine Instandsetzungsalternative für Bewe-gungsfugen in Verkehrswasserbauwerken?, Beton- und Stahlbetonbau 107, 2012 Heft 9, S. 601 – 612

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

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

3 Ergebnisse

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

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2013: Durchführung eines Pilotprojektes zu der Variante "Überbohren der Fugen" an einem Model aus Beton, mit einer Bohrfirma bei der Fugenspalt überbohrt wird und die Bohrung anschließend auf die Betonoberfläche läuft. In die Bohrung wird ein modifiziertes SBK einbetoniert. Auf der Betonoberfläche wird das SBK geklemmt.
- 2014: Durchführung eines Pilotprojektes zu der Variante "Überbohren der Fugen" an einem Schleusenbauwerk, 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).

Laufzeit des Vorhabens von 2008 bis 2014.

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.



Bild 1: Oberhaupt-Notverschlussnische mit gerissenem Mauerwerk

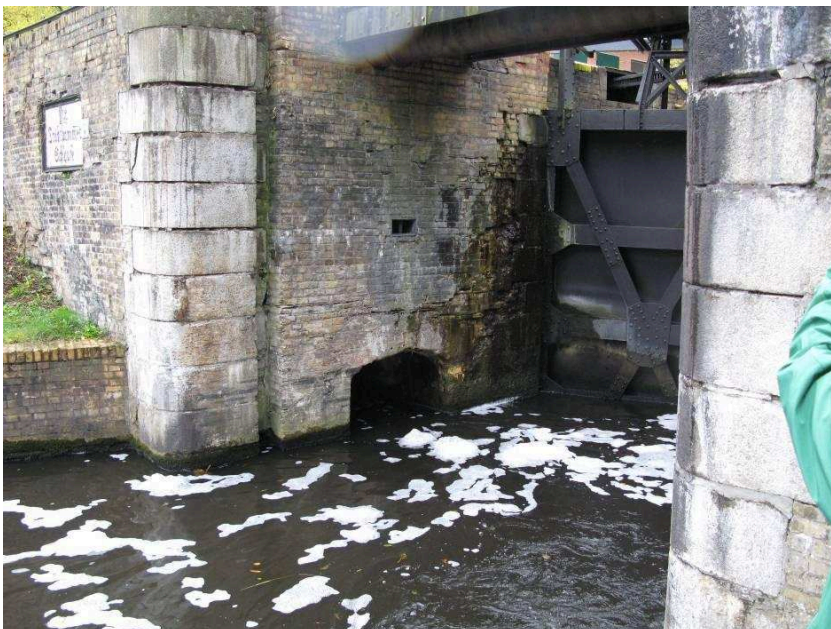


Bild 2: Unterhaupt mit wasserdurchlässigen Fugen, Materialverlust durch Abwitterung und schadhafter Kantensteinenkonstruktion

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Sachstandsstudie ist fertig. Der Schlussbericht ist für Mitte 2013 geplant.

Laufzeit des Vorhabens von 2009 bis 2013.

Betone für Verkehrswasserbauwerke mit Hydroabrasionsbeanspruchung

Netzplan-Nr.: A39510370008

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

E-Mail: frank.spoerel@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

Auch auf der Widerstandsseite, die durch den Beton beschrieben wird, sind noch viele Fragen offen, beispielsweise 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.

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., 2009] 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 3D-hydrodynamische Simulationen
 - Definition von Abrasionsregimen für bestimmte Bauteilgruppen
 - Ableitung von Hydroabrasionsklassen
- b) Bewertung von Performance-Prüfverfahren hinsichtlich deren Eignung zur Beurteilung wasserbau-relevanter Schädigungsmechanismen durch Hydroabrasion
- c) Erarbeitung von Anforderungen an Betonausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen zur Sicherstellung eines hinreichenden Widerstandes gegenüber Hydroabrasion

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

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

Erste Vorversuche wurden mit den Prüfeinrichtungen vorgenommen. Eine Bewertung des Verschleißes (Bild 1) erfolgt unter anderem mit einer optischen 3D-Messung (Bild 2). Eine weitere Zusammenarbeit zu den Schritten b) und c) ist mit Fachleuten auf dem Gebiet der Hydroabrasion vorgesehen.



Bild 1: Prüfkörper der Prüfeinrichtung nach [ASTM, (2010)], der Plattenabrationstrommel und der Verschleißtrommel nach [Bania, A., 1989] und [Vogel, M., Müller, H.S., 2009]

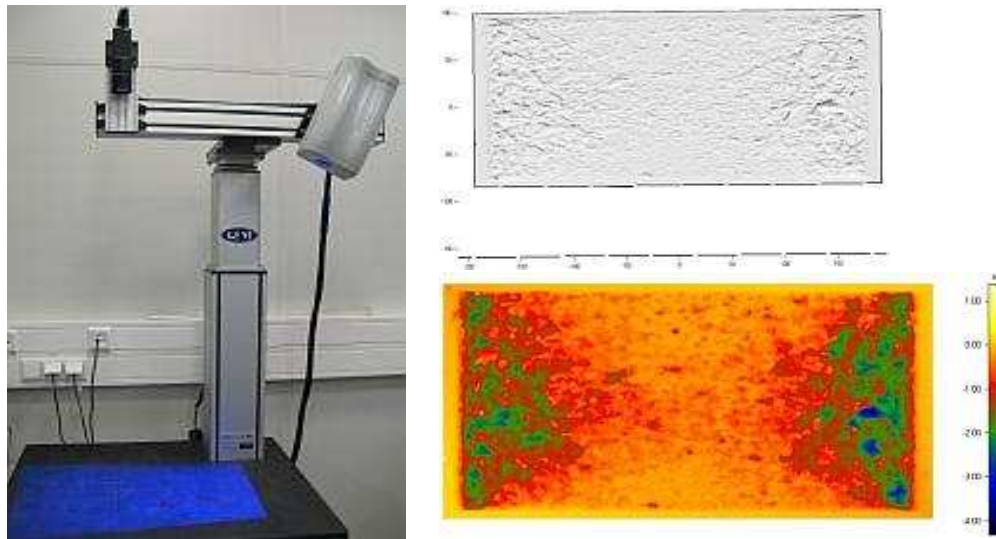


Bild 2: Optische 3D-Messung an Prüfkörpern

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2013: Ermittlung und Klassifizierung der Beanspruchung infolge Hydroabrasion für unterschiedliche Bereiche wasserbaulicher Anlagen aus Beton Ableitung von Hydroabrasionsklassen analog zur Expositionsklassensystematik, Erarbeitung und Abstimmung eines Versuchsprogramms für die systematische Untersuchung des Hydroabrasionsverschleißes, Durchführung systematischer Untersuchungen,
- 2014 Durchführung systematischer Untersuchungen, Bewertung der Untersuchungen und Festlegung von Anforderungen an Betone und Betonausgangsstoffe
- 2015: Abschluss der Untersuchungen und Abschlussbericht

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2015.

5 Literatur

- 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
- 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.: 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

6 Veröffentlichungen

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

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 2012 wurden für die in 2011 ausgewählten 4 Gesteinskörnungen aus dem mitteldeutschen Raum folgende Untersuchungen zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit weitgehend fertiggestellt:

- (a) Betonprüfungen gemäß Alkali-Richtlinie
- (b) Performance-Prüfungen an Betonen.

Für den Betonversuch (a) 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 betrug 9 Monate. Während der Lagerung wurde die Dehnung gemessen und innere sowie äußere Gefügeschäden (Risse) erfasst.

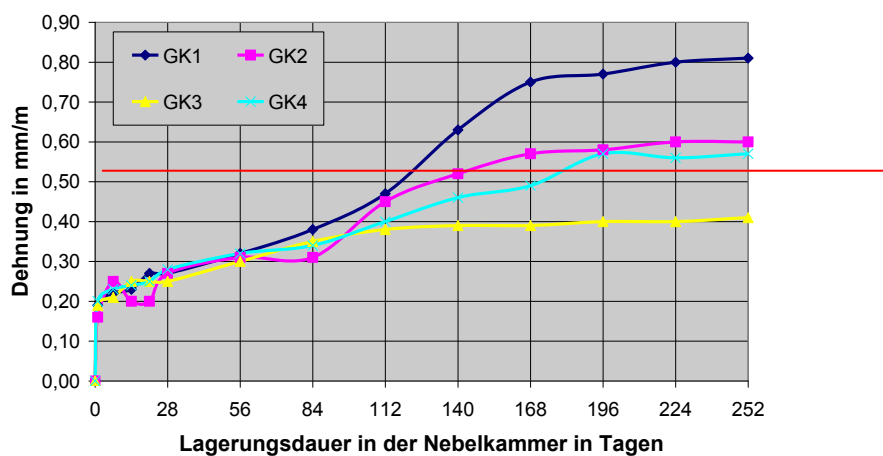


Bild 1: Betonversuch (a) in der 40°C-Nebelkammer für die 4 Betone mit erhöhtem Alkaligehalt

Die Gesteinskörnung GK1 ist bei einer Betondehnung von rd. 0,8 mm/m und Treibrissbildungen an den Proben eindeutig als alkaliempfindlich einzustufen. Bei den Betonen mit den Gesteinskörnungen GK2 und GK4 wurden als kritisch anzusehende Dehnungswerte von 0,6 mm/m nur knapp erreicht, dennoch wurden feine Risse an den Proben festgestellt. Bei der Gesteinskörnung GK3 zeichnet sich nur zu Beginn ein schwacher Anstieg der Dehnung ab ohne kritische Werte zu erreichen, jedoch wurde am 30-cm-Würfel eine beginnende Treibrissbildung beobachtet. Damit hat sich auch für diese 3 Gesteinskörnungen eine gewisse Alkaliempfindlichkeit bestätigt, eine abschließende Bewertung allein mit dem Standardverfahren Betonversuch (a) ist jedoch nicht möglich.

Ergänzend zum vorgenannten Betonversuch mit einem Alkalireichen Prüfzement wurden mit den gleichen Gesteinskörnungen Performance-Prüfungen (b) in einer speziellen Prüfvorrichtung der Bauhaus-Universität Weimar durchgeführt. Diese Prüfungen sollten eine eindeutigere Bewertung unter praxisnaher Beanspruchung ermöglichen. Die folgenden Betone mit Zusammensetzungen aus aktuellen Bauvorhaben der WSV wurden untersucht:

Tabelle 1: Betonzusammensetzungen für Performance-Prüfungen (b)

Beton	Zement		Wasser		Luft LP	Gesteinskörnungen				
	Bez.	z	w	w/z		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 diesen Betonen wurden die Performance-Prüfungen für je 2 Varianten (mit und ohne Salzbelastung) durchgeführt. Jeder Lagerungszyklus umfasste neben einer Trocken- und Feucht-Warm-Lage-

zung auch mehrere Frost-Tau-Wechsel. Einige ausgewählte Ergebnisse sind in den folgenden Bildern dargestellt.

Mit dem Verfahren (b) ist es gegenüber bislang zur Verfügung stehenden Verfahren möglich, die Beständigkeit des Betons auch bei Alkalizufuhr zu prüfen. Dies zeigt exemplarisch das Untersuchungsergebnis für die Gesteinskörnung GK2. Während ohne Salzbelastung keine AKR zu befürchten ist, führt eine Alkalizufuhr (NaCl-Lösung) eindeutig zu erhöhten Dehnungen infolge schädigender Treiberscheinungen.

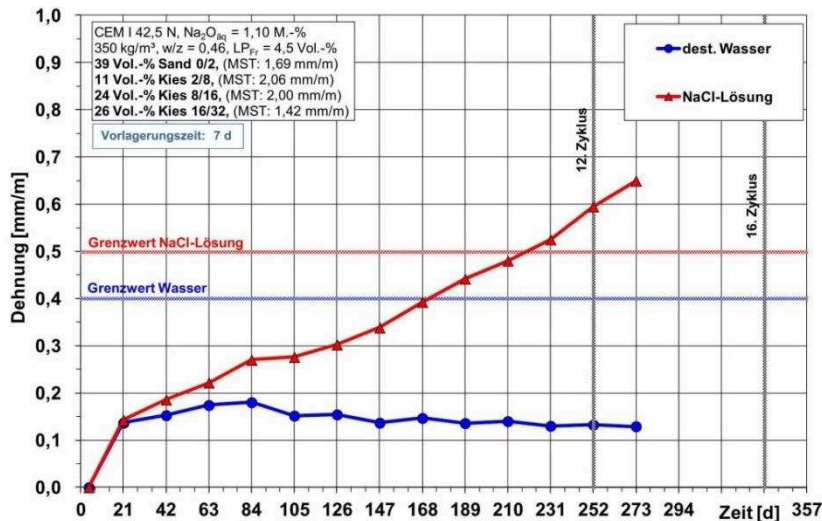


Bild 2: Ergebnis AKR-Performance-Prüfung für die Gesteinskörnung GK2

Bei der Gesteinskörnung GK3 ist die gleiche Tendenz erkennbar, der kritische Dehnungsgrenzwert nach 12 Prüfzyklen aber noch nicht erreicht. Daher wurde festgelegt, die Untersuchungen noch über den bislang für die Bewertung maßgebenden 12. Prüfzyklus hinaus fortzuführen.

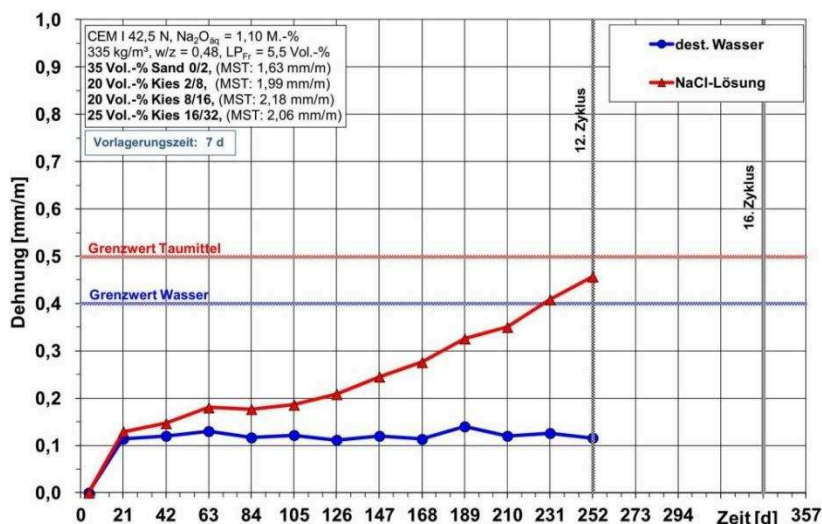


Bild 3: Ergebnis AKR-Performance-Prüfung für die Gesteinskörnung GK4

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2014: Abschluss der Messungen, Auswertung der Versuchsergebnisse und Abschlussbericht.

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2014.

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

In May, A., 2006, wurden für die Baugrube der Schleuse Sülfeld an zwei Messquerschnitte (NQ1 und NQ2) Parameteranalysen durchgeführt, um Informationen über verschiedene Modellierungsverfahren zu gewinnen. Der Verbau besteht im Norden aus einer Schlitzwand (Bild 1), die mit 9 Verpressankern rückverankert ist (NQ1), während die südliche Wand aus einer mit 4 Ankerlagen rückverankerten Spundwand besteht (NQ2), die in eine bis zum Fels reichende Dichtwand eingelassen ist. Die Schlitzwand bindet ebenfalls bis in den Fels ein. Das verwendete Rechenmodell (FE-Software Plaxis) ist in Bild 2 dargestellt.



Bild 1: Baugrube Schleuse Sülfeld im Bereich Oberwasser mit dem Messquerschnitt NQ1

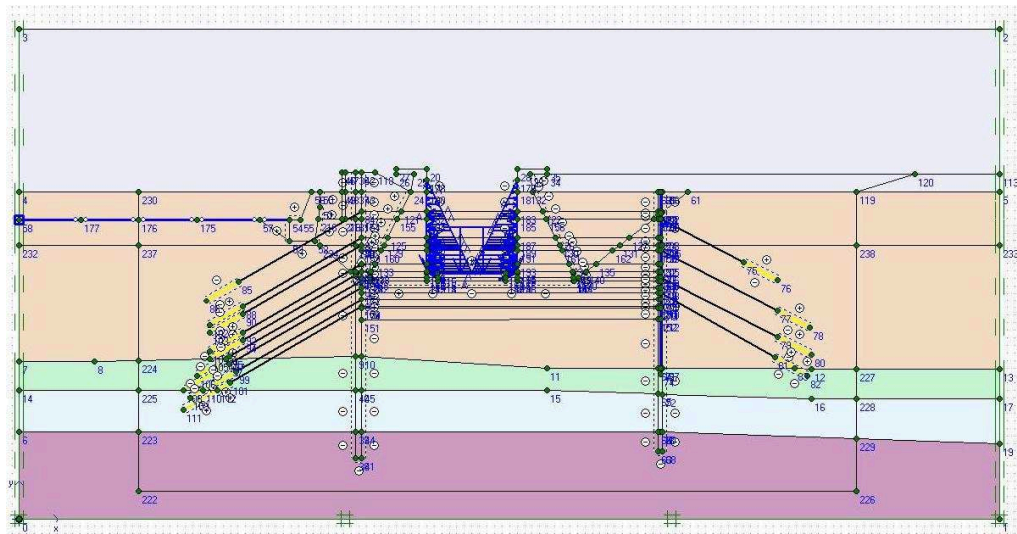


Bild 2: NQ1 und NQ2: Geometrie des Rechenmodells

3 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Schlussfolgerungen der Arbeit zusammengefasst:

Anfangsspannungszustand: Die Simulation eines vorbelasteten Baugrundes kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen, wobei man sich an Laborkennwerten oder Feldversuchsergebnissen orientiert, aber auch Erfahrungswerte bei der Modellierung der Vorbelastung bestimmter Böden eine wichtige Rolle spielen. Im Programm Plaxis kann z.B. im Programmblatt „initial conditions“ direkt für jede Bodenschicht ein eigenes OCR, POP oder ein erhöhtes K_0 von Hand eingegeben werden. Man kann aber auch die tatsächlich einmal vorhandenen gewesene Eislast in Form einer mächtigen Eisschicht mit entsprechender Wichte simulieren, die K_0 -Prozedur inklusive dieser Schicht durchlaufen und dann die Eislast wieder entfernen. In den Berechnungen wurde letzteres Verfahren verwendet. Für die Baugrube Sülfeld kann zusammenfassend gesagt werden, dass die Variante der Berücksichtigung der Vorbelastung einen wesentlichen Einfluss auf die aus einer Kalibrierung von Stoffgesetzen hervorgehenden Modellparameter hatte. So kann man für jede Variante unterschiedliche G_0 - und $\gamma_{0,7}$ -Werte (HSsmall-Modell) und andere Parameter für die beste Annäherung der Berechnungsergebnisse an die Messkurven finden. Der Einfluss der K_0 -Prozedur auf die Ergebnisse ist außerdem vom verwendeten Stoffmodell und der Größe der auftretenden Verformungen abhängig.

Stoffmodell: Der Vergleich zwischen den Stoffmodellen Hardening Soil und HS-small in Schwab, Benz, Vermeer, 2007, zeigt, dass das HS-small-Modell eine bessere Modellierung der Bodenreaktionen, als das ursprüngliche Hardening-Soil Modell ermöglicht. Zur Veranschaulichung sind in Bild 3 die gemessenen Horizontalverschiebungen im NQ1 zusammen mit den Berechnungsergebnissen für die beiden Stoffgesetze dargestellt. Weiterhin wurden die Auswirkungen der unterschiedlichen Vorgehensweisen zur Modellierung des Anfangsspannungszustandes untersucht (Modellierung der Eislast als Schicht oder Vorgabe von $K_0 = 0,8$). Der Einfluss des verwendeten Stoffgesetzes auf die Ergebnisse ist deutlich stärker als die Methode zur Modellierung des Anfangsspannungszustandes.

Durchlässigkeit: In Folge der vielzähligen Konsolidationsphasen und der komplizierten Grundwasserhältnisse wirkt sich eine Veränderung der Durchlässigkeit des Baugrunds relativ stark auf die Verformungen aus. Allgemein verursacht eine geringe Durchlässigkeit weniger Verformungen als eine hohe Durchlässigkeit.

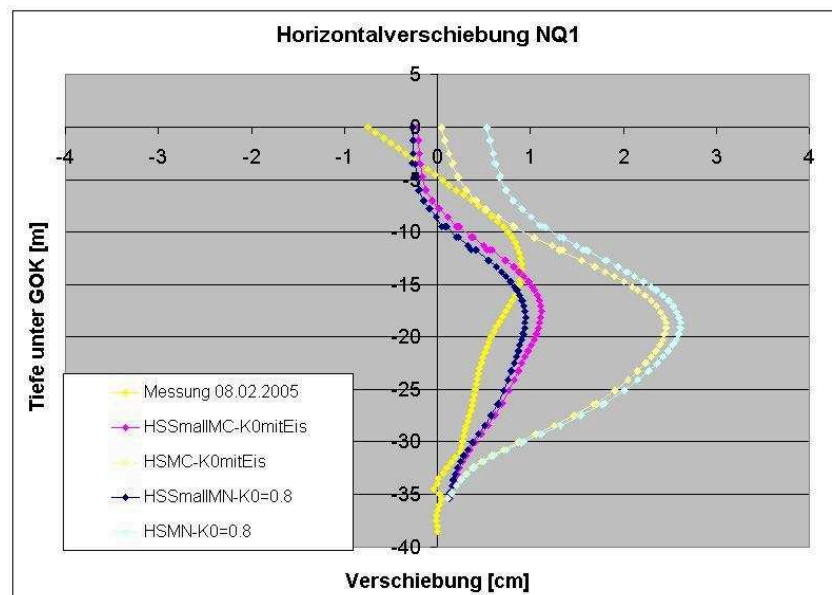


Bild 3: NQ1 - Vergleich Messwerte und Berechnung für die Stoffgesetze HS und HS-small [1]

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Der geplante Abschlussbericht zur Auswertung der Messungen und dem Vergleich mit numerischen Berechnungen beim Bau der Schleuse Sülfeld wurde fertig gestellt. Der Abschluss des Forschungsvorhabens ist für 2013 geplant.

Laufzeit des Vorhabens von 1997 bis 2013.

5 Literatur

- Mey A. (2006): "FE -Berechnung tiefer Baugruben mit einer Erweiterung des Hardening-Soil-Modells für den Bereich kleiner Dehnungen", Diplomarbeit, Institut für Geotechnik Universität Stuttgart, 2006
- Schwab R., Benz T., Vermeer P.(2007): "An accompanying small-strain model for a large excavation", Proc. XIV European Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Madrid

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.

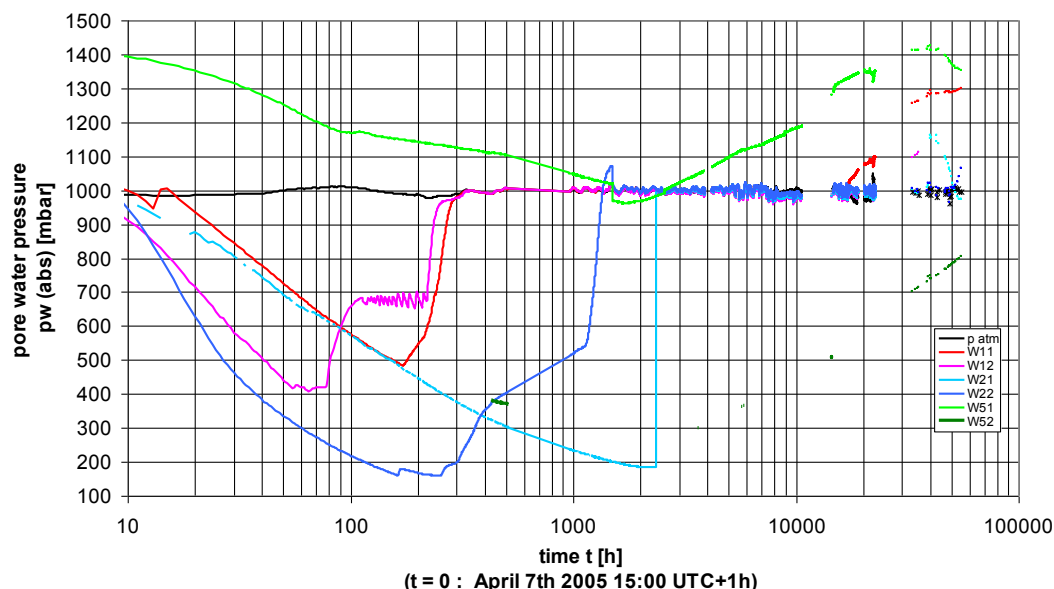


Bild 1: Porenwasserdruckentwicklung in der Messstrecke im Tonbergwerk Klingenberg/Main

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

in einem Aufsatz beschrieben, 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, wobei Anwendungsgrenzen der in Abschnitt 1.1 genannten Kontinuumsmodelle überschritten werden.

In Klingenberg wurden die letzten Messungen planmäßig am 13. Dezember 2011 durchgeführt, bevor im Zusammenhang mit der Betriebsschließung des Tonbergwerks der Probestollen –gemeinsam mit dem Stollensystem des Bergwerks – endgültig versiegelt wurde.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die für das Jahr 2012 vorgesehene schriftliche Zusammenfassung der Ergebnisse konnte leider noch nicht fertiggestellt werden.

Die im o. g. Aufsatz beschriebenen Beobachtungen zu plötzlichen Veränderungen der Materialeigenschaften des Tongebirges könnten auch zur Abschätzung der zeitabhängigen Standsicherheit von Einschnittsböschungen in überkonsolidiertem Ton verwendet werden. Damit eröffnen sich völlig neue Perspektiven, die Gegenstand nachfolgender Forschungsprojekte sein könnten.

Laufzeit des Vorhabens von 1999 bis 2013.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

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

Schulze R. (2010): Beitrag zum BAW-Kolloquium FuE im Binnenverkehrswasserbau am 03. März 2010 in Karlsruhe

Schulze R. (2011): Pore water pressure effects in clay due to unloading – long-term measurements, change of soil fabric and application, Proc. 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 Schiffstoßes eine relevante Größe besitzen und auf die Länge des Bremswegs deshalb nur einen untergeordneten Einfluss haben, genügen Modelle, bei denen der Schiffstoß als quasistatischer Vorgang abgebildet wird. Die Bremswegberechnung beruht auf dem Energieerhaltungssatz der Mechanik und bilanziert die kinetische Energie des Schiffes zu Beginn des Bremsvorgangs mit der Deformationsarbeit längs des Bremswegs und der Potentiellen Energie durch die Anhebung des Schiffes. Die Auswertung der Modellversuche zeigt, dass während des Bremsvorgangs von einer Mobilisierung des Grenzzustandes des passiven Erddrucks im Boden vor der Bugwand ausgegangen werden kann. Die Größe des

passiven Erddrucks ist von der Größe und der Neigung der Wandfläche, die mit dem Boden in Kontakt ist sowie von der Lage der Kontaktfläche in der Böschung (Neigung der Böschung oberhalb der Kontaktfläche und Abstand der Kontaktfläche zur Geländeoberkante) beeinflusst. Da sich das Schiff weiterbewegt bis die kinetische Anfangsenergie transformiert ist, wird davon ausgegangen, dass im Boden fortlaufend neue Bruchkörper entstehen. Dies kann auch durch die Videoaufnahmen eines unter statischen Bedingungen ausgeführten Versuches mit dem Spitzbugschiff verifiziert werden. Die flächenhaft und in unbekannter Verteilung zwischen Bug und Boden wirkenden Kontaktspannungen werden für die Berechnung der Energiebilanz zu einer resultierenden Kraft zusammengefasst. Der Angriffspunkt der Kraft ändert sich ebenfalls mit der Veränderung der Lage und der Größe der Kontaktfläche. Außer den Kräften aus dem Erdwiderstand wird die Änderung der Auftriebskraft bei der Anhebung des Schiffes berücksichtigt.

Das Berechnungsmodell wurde zunächst für das Pontonbugschiff aufgestellt und anhand der Versuchsergebnisse validiert (siehe Kurzbericht zum Forschungsvorhaben 2007).

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

Da der Verlauf des Bremswegs nicht von vorneherein bekannt ist, wird das Berechnungsverfahren inkrementell formuliert. Die wichtigsten Schritte des Berechnungsverfahrens sind:

- Berechnung der Größe und Lage der Kontaktfläche in Abhängigkeit einer vorgegebenen inkrementellen Drehung $\Delta\psi$ des Schiffes innerhalb jeden Weginkrementes 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 Anfahrgeschwindigkeit von $v_a \approx 20$ km/h. Die Grafik im Bild 1 rechts zeigt den Vergleich zwischen Messung und Rechnung für die horizontale Kontaktkraft sowie die Größe der berechneten vertikalen Kontaktkraft. Der Vergleich in Bild 1 zeigt, dass das Rechenverfahren auch für das Spitzbugschiff eine gute Übereinstimmung zwischen Messung und Rechnung festgestellt werden kann. Der Kurvenverlauf des Bremswegs zu Beginn des Bremsvorgangs verläuft rechnerisch geringfügig steiler im Vergleich zum experimentellen Ergebnis. Die zugehörige rechnerische horizontale Kontaktkraft ist dabei kleiner im Vergleich zur gemessenen Kraft.

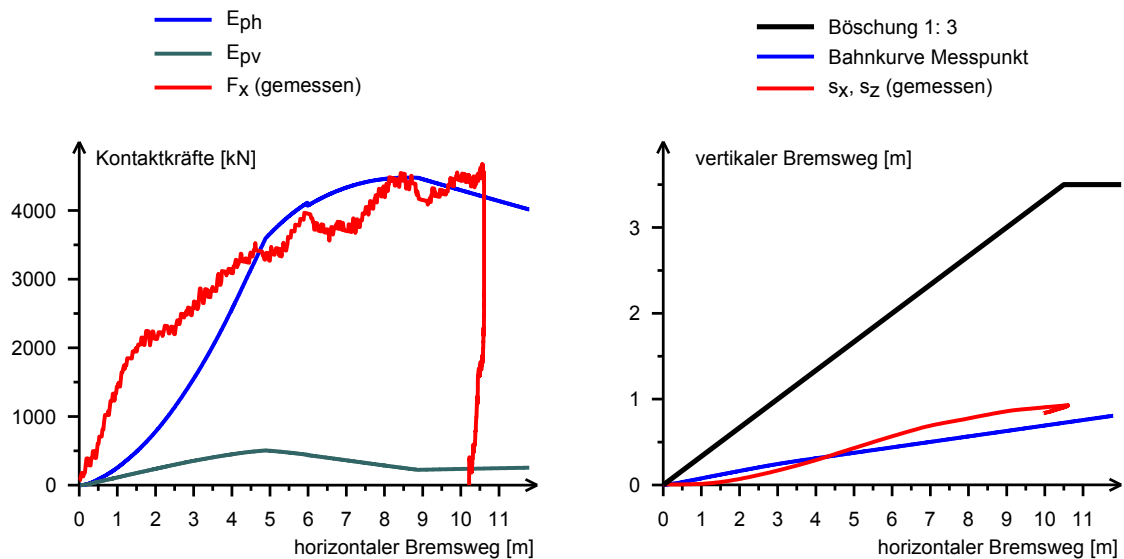


Bild 1: Berechnete und gemessene Kontaktkräfte (links) sowie berechneter und gemessener Bremsweg im Vergleich (rechts)

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 2012 nicht fortgesetzt werden. Für das Jahr 2013 sind weitere Vergleichsberechnungen und eine Evaluierung der vorhandenen Berechnungsverfahren geplant. Das Forschungsvorhaben soll 2013 abgeschlossen werden.

Laufzeit des Vorhabens von 2000 bis 2013.

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.

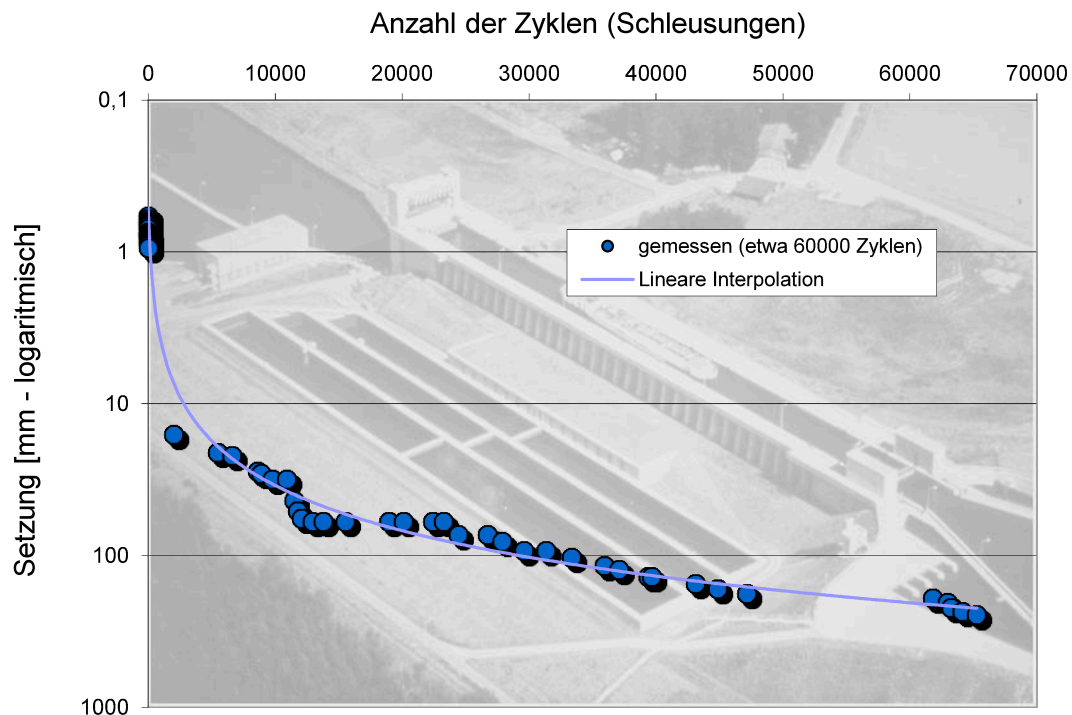


Bild 1: Setzungen der Schleuse Uelzen I als Funktion der Lastzyklen (= Schleusungen)

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).

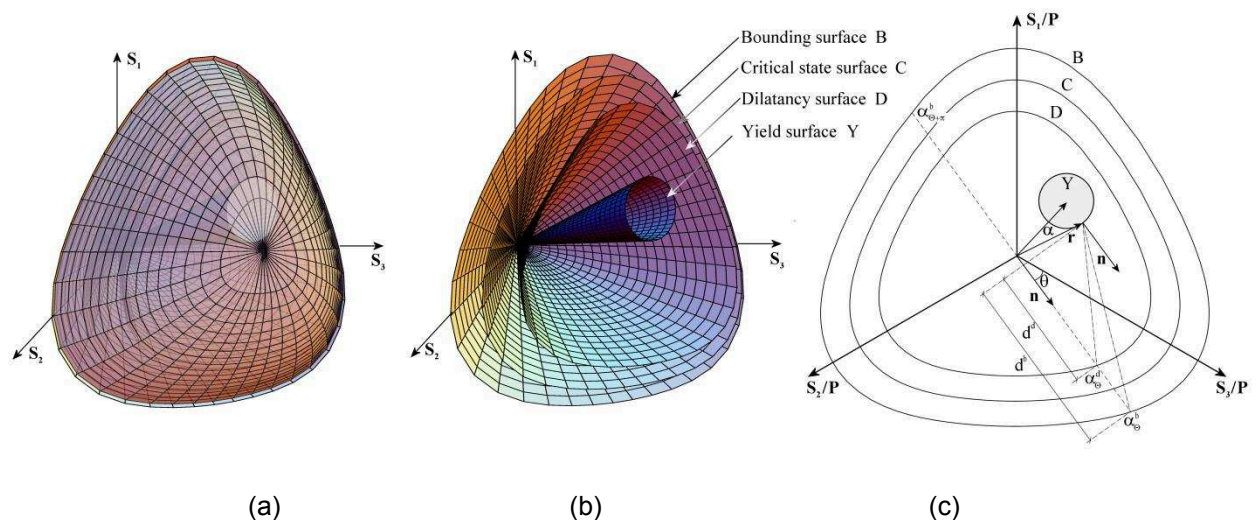


Bild 2: Das verwendete Bounding-Surface Modell im Hauptspannungsraum dargestellt:
(a) Kappe – nur der hervorgehobene Bereich der Kappe ist aktiv;
(b) Grenzflächen des Modells; (c) Projektionsregeln.

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

Aufgrund des großen Bedarfs für ein Stoffgesetz, das zyklische Bodenverhalten zutreffend simulieren kann, ist für 2013 und 2014 geplant, mit neuen Personalressourcen das Forschungsvorhaben zum Abschluss zu bringen. Als nächste Schritte in diesem Zeitraum sollen Konvergenzprobleme behoben werden und das Stoffgesetz für baupraktische Anwendungen bereitgestellt werden.

Laufzeit des Vorhabens von 2002 bis 2014.

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.

Wechselbelastungen an Kleinverpresspfählen

Netzplan-Nr.: A39520270001

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

E-Mail: eva.dornecker@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

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

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

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

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

3 Ergebnisse

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

Tabelle 1: Ergebnisse der statischen Pfahlprobelastungen

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

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

Die Festlegung der Lastamplitude und des mittleren Lastniveaus erfolgte unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Versuche mit Schwelllasten. Die Wechsellasten sollten, sofern der Pfahl nicht vorher versagt, über 50 000 Lastzyklen aufgebracht werden. Als Versagenskriterien für die Wechsellastversuche wurden eine mittlere absolute Pfahlkopfverschiebung von 15 mm oder eine Verschiebungsspanne (Differenz aus maximaler und minimaler Verschiebung innerhalb eines Lastzyklus) von 15 mm festgelegt.

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

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

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

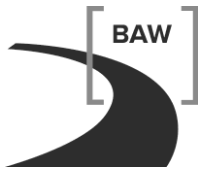
Ver- suchs- daten Pfahl	Lastbild				Zyklusanzahl	Zyklusanzahl bis zum Versagen 1. $S_{\text{mittel}} = 15 \text{ mm}$ 2. $S_{\text{zykl}} = 15 \text{ mm}$
	F_{mittel} [kN]	$F_{\text{max,Zug}}$ [kN]	$F_{\text{max,Druck}}$ [kN]	F'_{zykl} [kN]	N [-]	
W \ Belastung 1	+5	+20	-10	15	58.030	1.: $> 10^6$ **)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

*) Zyklenzahl aus Verschiebungsverläufen extrapoliert

**) Abschätzung

***) Zyklenzahl aus Verlauf der Verschiebungsamplitude extrapoliert

Durch das Forschungsvorhaben konnten erste Erkenntnisse über das Verhalten von Pfählen unter Wechselbelastung in bindigen Böden gewonnen werden. Die Ergebnisse reichen jedoch nicht aus um fundierte allgemeingültige Prognosen über das dauerhafte Tragverhalten zu erlauben. Hierzu sind weitere systematische Untersuchungen erforderlich. Die bei bindigen Böden unter zyklischen Belastungen auftretenden Versagensmechanismen sind bisher weitgehend unerforscht. Auch hier wären weitere Untersuchungen sinnvoll.



4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Arbeiten der TU München wurden 2012 abgeschlossen und in einem Bericht zusammengefasst. Der Abschlussbericht der BAW soll 2013 aufgestellt werden.. Der Abschluss des Vorhabens soll ebenfalls 2013 erfolgen.

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2013.

5 Literaturverzeichnis

Empfehlung des Arbeitskreises „Pfähle“ EA-Pfähle, 2 Auflage 2012

6 Veröffentlichungen

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

Bewertung dynamischer Probelastungen von Bohrpfählen

Netzplan-Nr.: A39520270002

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

E-Mail: markus.herten@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

Bild 1 stellt die Ergebnisse der Pfahlprobelastungen den Erfahrungswerten nach EA-Pfähle (2012) gegenüber. Die Unterschiede bei den dynamischen Pfahlprobelastungen sind deutlich größer als bei den statischen Pfahlprobelastungen. Allerdings sind sowohl lokale Baugrundabweichungen, als auch die größere Anzahl an Prüfungen zu beachten. Es zeigt sich, dass die im Projekt nach Erfahrungswerten der EA-Pfähle (2012) ermittelten Pfahltragfähigkeiten auch für das 10 % Quantil allgemein höher ausfallen, als nach den messtechnischen Ergebnissen der statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen. Generell kann die Übereinstimmung für fünf Pfähle als gut bezeichnet werden. Bei drei Pfählen ergab sich aus den Probelastung deutlich geringere Tragfähigkeiten.

Der Vergleich der Ergebnisse aus zusätzlich durchgeführten Zweit- und Drittprüfungen an schon von anderen geprüften Pfählen ist kritisch. Zum einen lagen den jeweiligen Prüfern keine Informationen zu den zuvor aufgebrachten Lasten und erzeugten Eindringungen vor und zum anderen wurden die Pfähle durch die Prüfung beschädigt. Bild 2 zeigt, dass die ermittelte Tragfähigkeit in der Erst-, Zweit- und Drittprüfung unsystematisch in der Größe variiert. Eine genauere Betrachtung ergab, dass hier im

Wesentlichen ein Einfluss der auswertenden Personen gegeben ist, die tendenziell immer relativ geringe oder relativ große Tragfähigkeiten ermitteln, unabhängig vom Pfahl und der Prüfreihefolge.

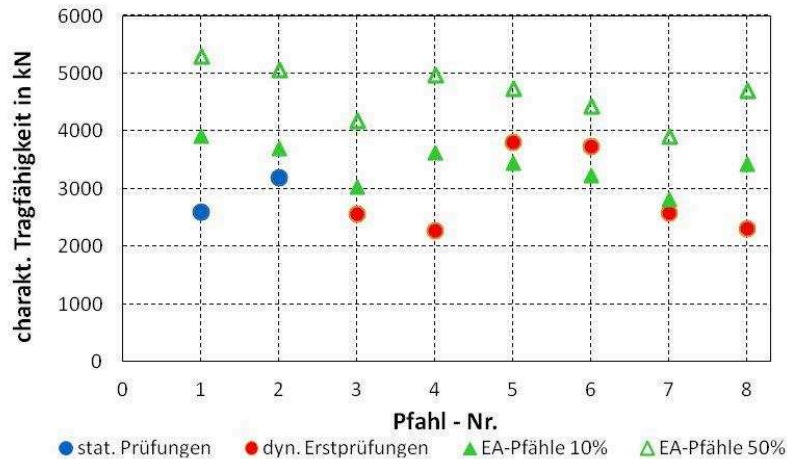


Bild 1: Vergleich statische und dynamische Probelastungen und Prognose

In einer zweiten Auswerterunde wurden allen Prüfern auch die Ergebnisse der statischen Pfahlprobelastungen und der anderen Prüfer übergeben. Eine Korrektur seiner ersten Prognose bezogen auf die Grenztragfähigkeit wurde von allen Prüfer nicht für erforderlich gehalten. In einer dritten Auswerterunde wurde allen das jeweilige Signal der Erstprüfung der Pfähle 4 bis 8 zur Verfügung gestellt. Die vorliegenden Ergebnisse von drei Prüfern variieren teilweise um über 30 %. Wobei auch hier wie zuvor beim Vergleich von Erst-, Zweit- und Drittprüfung tendenziell vom jeweiligen Prüfer immer relativ geringe oder relativ große Tragfähigkeiten ermitteln werden.

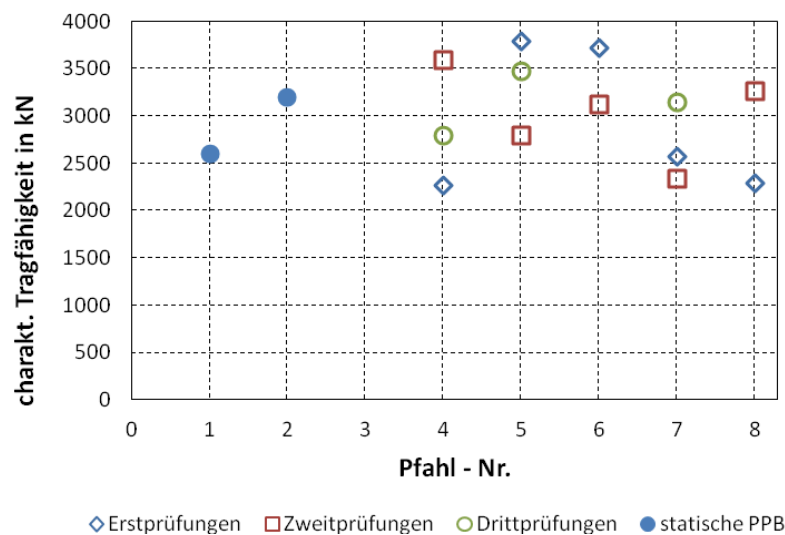


Bild 2: Vergleich Erst-, Zweit- und Drittprüfung

In Bild 3 sind die charakteristischen Pfahltragfähigkeiten für die Pfähle 1, 2, 3, 6 und 7 nach Auswertung eines Prüfers (C1) dargestellt. Als Vergleich gelten hier, sofern vorhanden, die Ergebnisse der statischen Pfahlprobelastung und ansonsten die 10%- und 50 %-Werte der EA-Pfähle (2012). Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung zu den statischen Ergebnissen. Die nach EA-Pfähle mit 10 %-Werten prognostizierten Tragfähigkeiten bilden die lokalen Unterschiede qualitativ bis auf Pfahl 1 gut ab, liegen aber über den aus den Probelastungen bestimmten Werten. Die Ergebnisse wurden jedoch teilweise bereits in Kenntnis der anderen statischen und dynamischen Prüfergebnisse erzielt wurden.

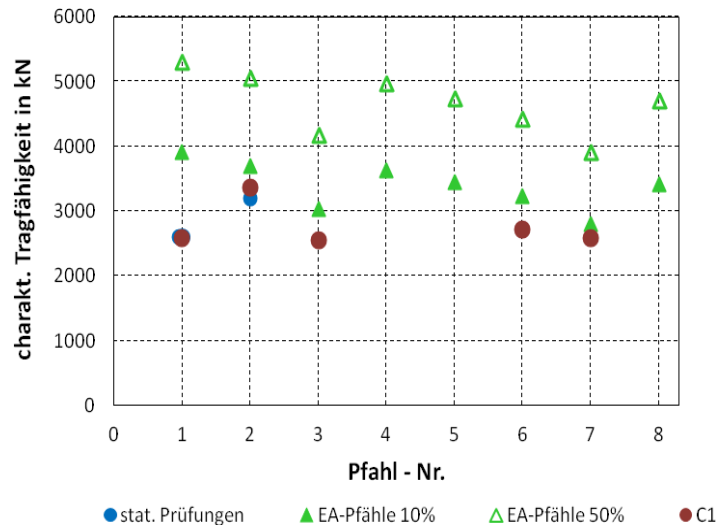


Bild 3: Ergebnisse des Prüfers C1

Vergleiche der dynamischen mit den statischen Prüfungen wurden durch das im Testfeld überraschend ausgeprägte Kriechverhalten, das nur bei statischen Prüfungen ermittelt werden kann, erschwert. Unter Einbeziehung der lokalen Tragfähigkeitsunterschiede ergaben sich hinsichtlich der Schwankungen gut interpretierbare Tragfähigkeitswerte, wobei einzelne Ausreißer auf der sicheren Seite liegen. Im Wesentlichen haben alle Prüfer festgestellt, dass die Pfähle des Ringversuchs gegenüber den Erfahrungswerten der EA-Pfähle niedrige Tragfähigkeiten aufweisen. Unabhängig hiervon hat sich jedoch auch gezeigt, dass alleine die Auswertung der Messsignale eines Schläges durch den „human factor“ über 30 % abweichende Grenztragfähigkeiten ergeben können. Die aktuelle Normung berücksichtigt die unterschiedliche Aussagekraft einer dynamischen Prüfung gegenüber einer statischen mit Erhöhungen der Streuungsfaktoren, die in der gleichen Größenordnung liegen. Abschließend ist festzuhalten, dass nach Durchführung des Ringversuchs sämtliche dynamisch geprüften Pfähle zerstört waren. Ursächlich war der relativ geringe mobilisierbare Spitzendruck, wodurch die aufgebrachte Energie am Fuß als Zugwelle reflektiert wird.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Veröffentlichung der Ergebnisse beim Pfahlsymposium Braunschweig

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2013.

5 Literatur

Bergholz, K.; Vertikale Grenztragfähigkeit von Spundwänden im Lockergestein, 32. Baugrundtagung, Tagungsband Forum für junge Geotechniker, S. 167-174, 2012

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

6 Veröffentlichungen

Baeßler, M., Niederleithinger, E., Georgi, S., Herten, M.: „Evaluation of the dynamic load test on bored piles in sandy soil“. In: Matsumoto, T.: IS Kanazawa 2012 - 9th International conference on testing and design methods for deep foundations, S. 155-162, 2012

Niederleithinger, E.; Baeßler, M.; Georgi, S.; Herten, M.; Tronicke, J.; Rumpf, M.; „Geotechnical and geophysical characterisation of a pile test site in post-glacial soil“. In: Coutinho, R., & P. Mayne: Geotechnical and Geophysical Site Characterisation 4, crcpress, 2012

Hydraulischer Grundbruch unter unterströmten Bauwerken mit luftseitigen Auflastfilter

Netzplan-Nr.: A39520370001

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

E-Mail: charlotte.laursen@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Auf Grundlage numerischer Grundwasserströmungsberechnungen durchgeführte Untersuchungen zeigen, dass für Baugruben mit unterströmten, relativ gering in den Untergrund einbindenden Wänden und baugrubenseitigem Auflastfilter der Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch gemäß den deutschen, aktuellen geotechnischen Regelwerken keine auf der sicheren Seite liegenden Ergebnisse liefert. Dies ist begründet durch die in diesem Fall signifikanten, vertikalen Strömungsanteile unterhalb des Wandfußes, die in üblichen Berechnungsansätzen nicht berücksichtigt werden. Zur sicheren Dimensionierung des Auflastfilters wurde von der BAW ein auf numerischen Strömungsberechnungen basierendes Verfahren vorgestellt, durch das auch die vertikalen Strömungskräfte unterhalb des Wandfußes sowie zusätzlich Sicherheiten nach DIN 1054 berücksichtigt werden (Odenwald, Herten, 2008).

1.2 Bedeutung für die WSV

Bei Baumaßnahmen an Schifffahrtskanälen werden in zunehmendem Maß tiefe Baugruben unmittelbar neben in Betrieb befindlichen Kanalstrecken erstellt, um den Schifffahrtsbetrieb auch während der Baumaßnahme aufrecht zu erhalten. Um die aus dem Nachweis gegen hydraulischen Grundbruch resultierende, erforderliche Einbindetiefe der Baugrubenumschließungswände in den Baugrund zu reduzieren, erfolgt die Sicherung gegen hydraulischen Grundbruch oft durch einen Auflastfilter auf der Baugrubensohle. Die Entwicklung eines auf der sicheren Seite liegenden Berechnungsansatzes ist für die WSV von grundlegender Bedeutung für die sichere und wirtschaftliche Durchführung von Baumaßnahmen an Bundeswasserstraßen.

1.3 Untersuchungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Untersuchung des Versagensmechanismus des hydraulischen Grundbruchs bei luftseitig aufgebrachtem Auflastfilter. Auf Grundlage der im Rahmen dieses Vorhabens durchgeführten Untersuchungen, die sich aus numerischen Berechnungen und Modelluntersuchungen zusammensetzen, soll der von der BAW entwickelte, vereinfachte Berechnungsansatz (Odenwald, Herten, 2008) validiert und ggf. weiterentwickelt werden.

2 Untersuchungsmethoden

Der Fokus liegt auf der Durchführung von Versuchen zur Visualisierung des Bruchvorganges. Zur visuellen Auswertung der Versuche wird die Particle Image Velocimetry (PIV) Method eingesetzt. Ergänzend werden numerischen Berechnungen mittels Diskrete-Elemente-Methode (Particle Flow Code) durchgeführt um die Ergebnisse der Modellversuche nachzumodellieren.

3 Ergebnisse

Im Auftrag der BAW wurde von der Universität der Bundeswehr München (Prof. Boley) ein Versuchsstand zur Visualisierung des Versagens durch hydraulischen Grundbruch bei Unterströmung einer Spundwand erstellt. Messtechnisch werden die Versuche durch die kontinuierliche Erfassung des Porenwasserdruck im Bereich des Spundwandfußes, der Hebung des Bodenkörpers luftseitig der Spundwand und des Durchflusses begleitet. Ergänzend erfolgte eine visuelle Dokumentation mittels Videoaufnahme sowie durch die Aufnahme digitaler Einzelbilder.

Insgesamt wurden 22 Versuche durchgeführt. Im Rahmen dieser Versuche wurde die Einbindetiefe der Spundwand und die Einbaustärke des Filters variiert. Die Versuche zeigten, dass der zeitliche

Ablauf des Versagensprozess bei den Versuchen mit geringer Filterdicke und denen mit größerer Filterdicke grundsätzlich verschieden ist und belegen somit, dass die Dicke des Filters einen bedeutenden Einfluss auf den Versagensprozess hat. Bei den Versuchen mit der geringer Filterschichtdicke zeigen sich deutliche Hebungen in dem der Spundwand vorgelagerten Bereich bereits einige Potenzialstufen bevor der eigentliche Bruch eintrat. Bei den Versuchen, die mit großen Filterdicken durchgeführt wurden, trat der Bruch ein bis drei Minuten nach Beobachtung der ersten Hebungen auf. Beispielhaft sind in Bild 1 die absoluten Bewegungen im Bereich des Spundwandfußes für verschiedene Potenzialstufen dargestellt, die mit Hilfe der Particle Image Velocimetry (PIV) Method ausgewertet wurden.

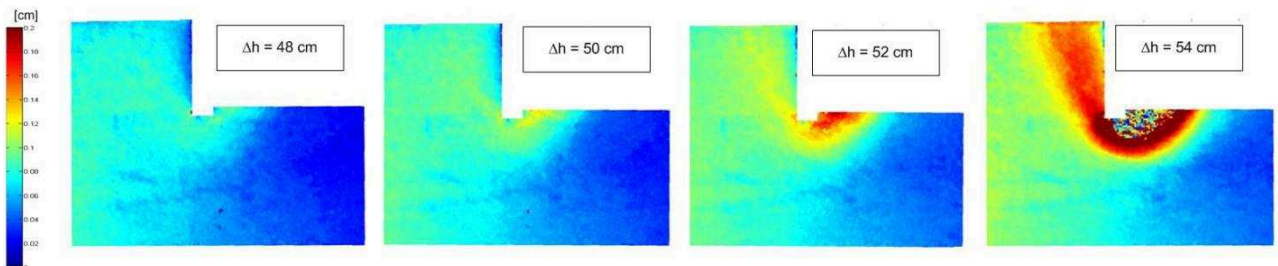


Bild 1: Absolute Bewegungen im Bereich des Spundwandfußes für verschiedenen Potenzialstufen

Um eine direkte Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse mit dem Berechnungsansatz nach Odenwald und Herten (2008) zu schaffen, wurde der Berechnungsansatz an die Randbedingungen des Modellversuches angepasst. Bild 2 zeigt die im Versuch und anhand des Berechnungsansatzes ermittelten max. Potentialdifferenzen Δh_{krit} in Abhängigkeit der Einbindetiefe der Spundwand. Die Werte zeigen eine relativ gute qualitative Übereinstimmung. Quantitativ ist eine deutliche und mit zunehmender Dicke des Auflastfilters wachsende Abweichung zu erkennen.

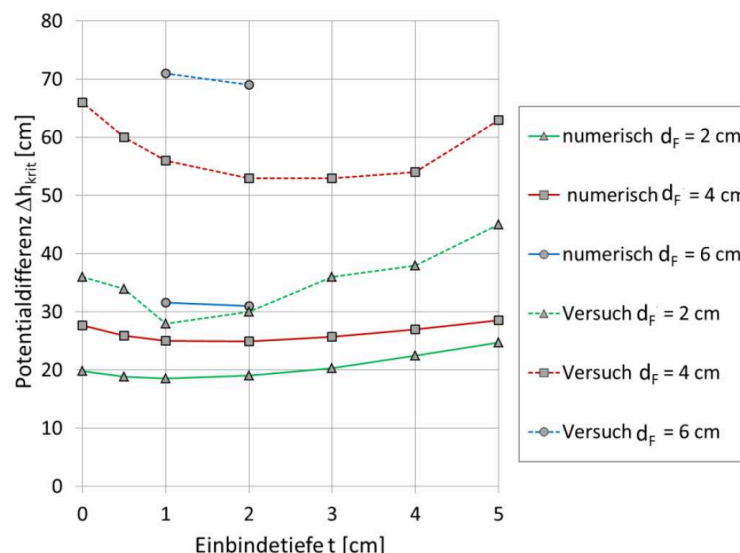


Bild 2: Vergleich Versuchsserie - Berechnungsansatz nach Odenwald und Herten (2008)

Zur Modifizierung des Berechnungsansatzes nach Odenwald und Herten (2008) werden folgende Varianten betrachtet:

- Variante 1: Ersatzkörpergeometrie entsprechend der mittels PIV Methode erfassten Versagenskörpergeometrie und
- Variante 2: Ersatzkörpergeometrie auf Grundlage der Verteilung des kritischen hydraulischen Gradienten i_{krit} .
- Bei beiden Varianten werden außerdem zusätzlich Reibungskräfte berücksichtigt. Die beste Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen ergibt sich für eine Ersatzkörpergeometrie entsprechend Variante 2.

Um die mechanische Wirkung eines Auflastfilters umfassend zu analysieren, wurden in einem weiteren Schritt Zylinderdurchströmungsversuche (Bild 3) 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, werden ergänzend numerischen Berechnungen mittels Diskrete-Elemente-Methode (Particle Flow Code) durchgeführt. Die Berechnungen werden in 2013 abgeschlossen und zusammen mit den Erkenntnissen aus den Zylinderdurchströmungsversuchen abschließend dargestellt und interpretiert.



Bild 3: Versuchsaufbau der Zylinderdurchströmungsversuche

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Auswertung Versuchsreihe „Eindimensionale Durchströmungsversuche“

Laufzeit des Vorhabens von 2009 bis 2013.

5 Literaturverzeichnis

Odenwald, B; Herten, M. (2008): Hydraulischer Grundbruch: neue Erkenntnisse, Bautechnik 85/9, S. 585 – 595.

6 Veröffentlichungen

Schober, P., Boley, C., Odenwald, B. (2011): Research on hydraulic heaves at excavations with surcharge filters. 15th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ECSMGE 2011), 12. - 15. September 2011, Athen, Griechenland, pp. 575 - 580

Schober, P., Boley, C., Odenwald, B., (2011): Hydraulic Heave Safety at Excavations with Surcharge Filters. 3rd International Symposium on Geotechnical Safety and Risk (ISGSR). 02. - 03. Juni 2011, Munich, Germany, pp. 677 - 684

Schober, P., Odenwald, B. (2012): Der Einfluss eines Auflastfilters auf die Bruchmechanik beim hydraulischen Grundbruch. BAWMitteilungen Nr. 95 „Johann-Ohde-Kolloquium“, Karlsruhe, S. 151 – 162.

Hydraulische Wechselwirkungen zwischen Grund- und Oberflächenwasser

Netzplan-Nr.: A39520370002

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

E-Mail: hector.montenegro@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

Flussauen werden im Uferbereich durch die Überflutungsdynamik und mitunter bis weit ins Hinterland durch die Grundwasserdynamik geprägt. Änderungen der Abflussverhältnisse oder des hydraulischen Anschlusses an der Gewässersohle, beispielsweise durch Anpassungsmaßnahmen, wirken somit unmittelbar auf das Grundwasserregime und letztlich auf den Wasserhaushalt der Aue. Die 2009 erfolgte Deichrückverlegung in Lenzen eröffnet die Möglichkeit den komplexen Wirkungszusammenhang zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser im Naturmaßstab zu beobachten und derzeit verwendete Modellansätze kritisch zu überprüfen.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Austauschprozesse zwischen Oberflächen- und Grundwasser werden in der Regel über großräumige Wasserbilanzen abgeschätzt, die im Feldmaßstabmesstechnisch sehr schwer zu bestimmen sind. Derzeitige Modellvorstellungen gehen von einem von der Potentialdifferenz Δh zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser abhängigen Wasseraustausch Q_L aus, der durch einen „Übergangswiderstand“ (Leakagekoeffizient λ) gesteuert wird. Allerdings beobachtet man häufig unterschiedliche Leakageflüsse Q_L bei Infiltration und Exfiltration trotz identischer Potentialdifferenz Δh . Ferner gibt es Hinweise, dass die Beziehung zwischen Potentialdifferenz und Leakagefluss einen hysteretischen Verlauf im Auf- und Ablauf eines Hochwasserereignisses aufweist, was auf eine zeitliche Abhängigkeit hinweist.

1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund gestiegener Anforderungen an die Belastbarkeit von Prognosen der Auswirkungen von wasserbaulichen Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen auf die Grundwasserdynamik in Flussauen, ist ein besseres Verständnis der Austauschprozesse zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser unerlässlich. Voraussetzung hierfür sind Naturmessungen im relevanten Maßstab des Wasseraustauschs zwischen den Wasserkörpern.

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 Messdaten der Wasserstände im Oberflächen- und Grundwasser. Ohne hydraulischen Anschluss zum Fluss können auf Grundlage eines digitalen Geländemodells (DGM) die in Flutmulden des Untersuchungsgebiets gemessenen Wasserstandsänderungen in Wasserflüsse Q_L aus oder zum Grundwasser unter Berücksichtigung von Niederschlag und Evaporation umgerechnet werden. Die für die einzelnen Flutmulden bestimmten zeitlichen Verläufe der Q_L - Δh -Beziehungen sind dahingehend zu untersuchen,

- ob eine generelle Richtungsabhängigkeit (In-/Exfiltration) vorliegt,
- wie die Veränderung der Kontaktfläche (infolge Wasserstandsänderung) zwischen Oberflächengewässer und Grundwasserleiter den Austauschbeeinflusst,
- ob eine Zeitabhängigkeit während der In- und/oder Exfiltration vorliegt und
- ob Erosions- und Sedimentationsphasen den Übergangswiderstand maßgebend beeinflussen.

Im Nachlauf hierzu werden mittels eines instationären Grundwasserströmungsmodells mit konventionellem Leakageansatz die Grundwasserstände berechnet und diese sowie die für die Flutmulden berechneten Austauschraten Q_L zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser den Messwerten gegenüber gestellt. Die Abweichungen lassen eine Bewertung des Austauschansatzes zu und geben

möglicherweise Hinweise, wie dieser zu erweitern ist, um die Austauschprozesse besser abbilden zu können.

2 Untersuchungsmethoden

Um das Ein- und Abfließen von Hochwasserereignissen im Deichrückverlegungsgebiet Lenzen 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 (OW), der Grundwassermessstellen (GW) sowie das Relief im Untersuchungsgebiet (schwarze Berandung) sind in Bild 1 dargestellt. Die Oberflächenwassermessstellen wurden auf die spezifischen Anforderungen der bei Flutung zu erwartenden Strömungskräfte entworfen und bestehen aus einem dickwandigen perforierten Rohr, das in einem 1 m tiefen Betonfundament fixiert ist. Innerhalb dieses Rohrs befindet sich ein Filterrohr, in das ein 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. Die Wasserstandsmessdaten werden in einem Datenlogger gespeichert und sobald die Wasserstände unter den Messstellenkopf abgefallen sind per Funk übertragen.

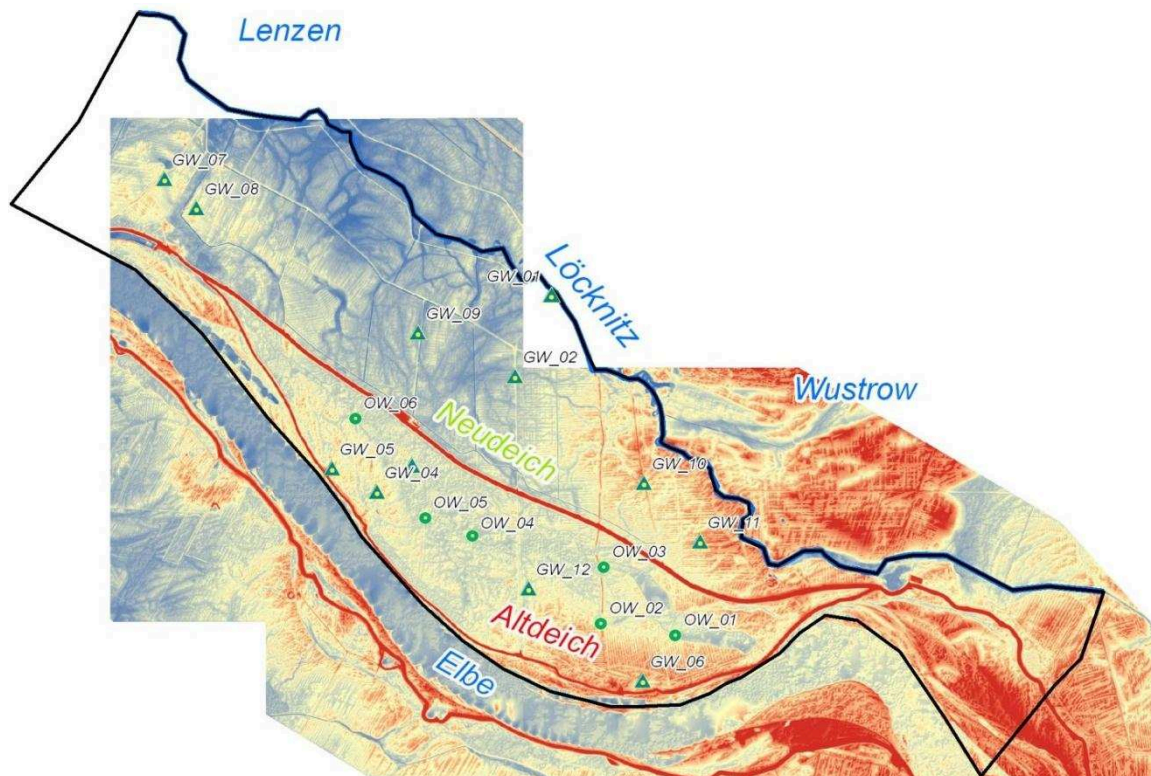


Bild 1: Relief (rot: hoch, blau: tief) im Deichrückverlegungsgebiet Lenzen und Lage der Oberflächenwassermessstellen (Kreise) und Grundwassermessstellen (Dreiecke).

3 Ergebnisse

2012 war geprägt von 3 zeitlich kurz aufeinander auflaufenden Hochwasserereignissen, die zu einer Durchströmung des neu eröffneten Vorlandes führten. Diese Ereignisse konnten mit dem GW-OW-Erfassungssystem aufgezeichnet werden. Die Messungen liefern einen detaillierten Einblick in das sich zeitlich verändernden Fließgefälle im Verlauf der Ein- und Durchströmung des neuen Vorlandes. Diese Feldmessungen sind wertvoll für die Validierung der im Referat W2 durchgeführten HN-Modellerrechnungen. In Bezug auf die Überprüfung des Austauschansatzes bei Grundwasserberechnungen sind die Zeiträume interessant, in denen keine direkte hydraulische Anbindung zur Elbe be-

steht und der Austausch ausschließlich (abzüglich Niederschlag und Evaporation) über das Grundwasser erfolgt.



Bild 2: Überflutung des neuen Deichvorlands (Blick stromaufwärts, Luftbild K. Nabel, 2012).

Die Grundwasserströmung im Untersuchungsgebiet wurde auf Grundlage eines instationären 2D Finite-Elemente Modells untersucht. Zur inversen Bestimmung der Modellparameter Durchlässigkeit, speichernutzbare Porosität sowie Leakagekoeffizienten wurde ein Zeitraum von ca. 9 Monate modelliert, in dem keine Zuströmung von der Elbe erfolgte. Basierend auf diesem Modell wurde ein Überflutungsereignis berechnet. Die Einströmung und Überflutung des Vorlandes wurde gemäß den aufgezeichneten Oberflächenwasserständen als externe Randbedingung vorgegeben. Der Wasseraustausch im Modell wurde auf die Flutrinnen beschränkt, da die flächendeckende Auelehmschicht den quartären Grundwasserleiter gegenüber Oberflächen zu- und -abflüssen sehr gut abschirmen dürfte. Trotz erheblicher Vereinfachungen war das Grundwassermodell in der Lage, die generelle Grundwasserdynamik während des Überflutungsereignisses plausibel abzubilden, wenn auch an einigen Stellen die gemessenen Grundwasserstandsganglinien nicht über den gesamten Berechnungszeitraum zufriedenstellend modelliert werden konnten.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2013.

Entsprechend den Untersuchungsschwerpunkten werden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Das Oberflächen-Grundwasser-Messstellennetz ist weiterhin zu warten.
- Die aufgezeichneten Oberflächenwasserstände werden plausibilisiert und W2 zur Verfügung gestellt, damit hieraus ein Datensatz zur Validierung des HN-Modells „Lenzen“ ausgewählt werden kann.
- Die für die einzelnen Flutmulden ausgewerteten zeitlichen Verläufe der Q_L - Δh -Beziehungen sind gemäß der unter Kapitel 1.3 skizzierten Aspekte im Detail zu untersuchen,
- Etwaige systematische Abweichungen sind zu identifizieren und es ist zu überprüfen, ob diese durch Modifikation des verwendeten Austauschansatzes verringert werden können.
- Die ursprüngliche anvisierte direkte Kopplung des HN- und GW-Modells wird nicht mehr als zielführend angesehen.

Die Vorlage des Abschlussberichts ist für Mitte 2013 geplant.

Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerke

Netzplan-Nr.: A39520410006

Projektleiter/in: Dipl.-Ing. P. Fleischer, Dr.-Ing. J. Kayser, Abteilung Geotechnik,
Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

E-Mail: petra.fleischer@baw.de, jan.kayser@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die derzeitige Bemessung von Deckwerken aus losen oder teil- bzw. vollvergossenen Wasserbausteinen im Bereich der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) erfolgt für Standardfälle nach dem „Merkblattes zur Anwendung der Regelbauweisen für Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen“ (MAR), ansonsten nach den „Grundlagen zur Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Wasserstraßen“ (GBB), die die theoretischen Bemessungsgrundlagen nach dem derzeitigen Stand der Technik beinhalten. Zur Erleichterung der Anwendbarkeit des GBB wurden die Berechnungsalgorithmen zusätzlich in einer Software „GBBSoft“ umgesetzt. Die überwiegend auf Erfahrungen beruhenden, parameterbehafteten Bemessungsansätze müssen jedoch weiter präzisiert werden. Dazu ist es erforderlich, verstärkt praktische Erfahrungen mit bestehenden Deckwerken zu sammeln, zu dokumentieren und systematisch auszuwerten, um auf dieser Grundlage die Bemessungsansätze zu validieren und kontinuierlich bedarfsgerecht weiterzuentwickeln. Aus diesem Grund wurde vor einigen Jahren mit einer umfassenden, langfristig angelegten Bestandsaufnahme vorhandener Deckwerken der WSV begonnen. Dabei werden möglichst viele unterschiedliche Wasserstraßenabschnitte hinsichtlich des Erhaltungszustandes der Deckwerke und des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes unter Berücksichtigung der jeweils gegebenen Randbedingungen und der hydraulischen Belastung im Vergleich zu den theoretisch erforderlichen Deckwerksabmessungen begutachtet. Das Ziel besteht letztendlich darin, die Deckwerkbauweisen an Binnenwasserstraßen durch Präzisierung der theoretischen Grundlagen auf der Basis der Ergebnisse der Bestandsaufnahme sukzessiv weiter zu optimieren.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

Folgende Untersuchungsmethoden kommen zur Anwendung:

- Erfassung des Aufbaus und Erhaltungszustandes der Deckwerke und der technischen Randbedingungen (z. B. Geometrie, Baugrund) in situ sowie des Unterhaltungsaufwandes in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten,
- Durchführung von Naturmessungen in ausgewählten Wasserstraßenabschnitten zur Ermittlung der hydraulischen Uferbelastungen infolge Schifffahrt,

- Theoretische Berechnungen zur Ermittlung der erforderlichen Deckwerksabmessungen unter den ermittelten Randbedingungen unter Verwendung der Software GBBSoft, Vergleich mit den jeweils ermittelten Istzuständen,
- Auswertung der Ergebnisse, Validierung der Bemessungsansätze (GBB),
- Untersuchungen zu neuen Möglichkeiten der Erfassung des Zustandes des Deckwerks über und unter Wasser,
- Formulierung von Empfehlungen für eine optimale Bemessung und Ausführung von Deckwerken.

3 Ergebnisse

Bisher wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens Deckwerke in 8 unterschiedlichen Abschnitten folgender Wasserstraßen begutachtet:

- Süd- und Nordstrecke des Dortmund-Ems-Kanals,
- Wesel-Datteln-Kanal,
- Main-Donau-Kanal,
- Mittellandkanal,
- Untere Havel-Wasserstraße.

Dabei handelte es sich um durchlässige Deckwerke überwiegend aus losen Wasserbausteinen, nur am Mittellandkanal wurden auch Deckwerke aus teil- und vollvergossenen Wasserbausteinen untersucht. Die Ergebnisse wurden ausgewertet und in Teilberichten dargestellt und bildeten u. a. die Grundlage für eine Optimierung der Bemessungsansätze des GBB. 2011 konnte eine überarbeitete Fassung des GBB veröffentlicht werden. 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).

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

Aus Zeitgründen und aufgrund anderer Prioritäten mussten die Arbeiten im Rahmen des Forschungsprojektes 2012 unterbrochen werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Folgende Arbeiten sind in den nächsten Jahren vorgesehen:

- Durchführung weiterer Untersuchungen zur Zustandserfassung von Deckwerken unter Wasser,
- Auswertung der Messungen an der UHW,
- Bilanz der bis jetzt untersuchten Strecken mit einem Zwischenfazit, danach Entscheidung über die Untersuchungen an weiteren Strecken

Aufgrund der z. T. langjährigen Beobachtung von Teilstrecken und zur Umsetzung des umfangreichen Untersuchungsprogramms wird das Forschungsvorhaben noch ca. 4 Jahre in Anspruch nehmen.

Laufzeit des Vorhabens von 1999 bis 2016.

Bemessung von geotechnischen Filtern unter instationärer Belastung

Netzplan-Nr.: A39520410076

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

E-Mail: jeannine.eisenmann@baw.de

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

In der Geotechnik werden Filter noch überwiegend nach geometrischen Kriterien bemessen, die an körnigen Materialien unter stationärer, einseitiger Durchströmung mit begrenzten hydraulischen Gradienten untersucht wurden. Unter dem Einfluss von Druckwechselbelastungen können hohe hydraulische Gradienten auftreten, welche insbesondere bei feinkörnigen Böden ohne Kohäsion zu Bodenverlagerungen führen können. Diese werden durch die gasförmigen Einschlüsse in den Poren und dem Porenwasser hervorgerufen, welche die Kompressibilität des Porenwassers signifikant verändern. Zur Beurteilung dieses Einflusses auf die Stabilität und Bemessung sowohl der geotextilen Filter als auch der Kornfilter fehlen derzeit noch eindeutige Kriterien.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die Interaktion zwischen Filter und Boden wird an den Böschungs- und Sohlsicherungen der Bundeswasserstrassen im Unterwasserbereich maßgeblich von Wechselbelastungen bestimmt. Diese werden i. d. R. durch von der Schifffahrt induzierte Wellen hervorgerufen. Derzeit erfolgt die Filterbemessung für Kornfilter nach den Angaben des Merkblattes der BAW „Anwendung von Kornfiltern an Wasserstrassen“ (MAK) und dem darin verwendeten Ansatz nach Cistin/Ziems. Hierbei ist jedoch noch weitgehend offen, inwieweit der Einfluss aus dynamischen Belastungen in den bestehenden Kriterien berücksichtigt werden muss oder ob vollkommen neu zu definierende Bemessungskonzepte für die geschilderte Fragestellung erforderlich sind.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel des Forschungsvorhabens ist es, eindeutige Kriterien zur Beurteilung des Einflusses von Wechselbelastungen auf die Stabilität und Bemessung sowohl von geotextilen Filtern als auch von Kornfiltern zu erhalten.

2 Untersuchungsmethoden

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

Zur Untersuchung der hieraus abgeleiteten weiteren Fragestellungen wurde eine vollständige Überarbeitung der Wechseldurchströmungsanlage erforderlich. Mit Hilfe der neuen Anlage sollen die üblicherweise an Wasserstraßen auftretenden hydraulischen Druckwechselbelastungen bei gleichzeitiger Durchströmung der Probe aufgebracht werden können. Bei den in der Wasserstraße üblichen Drücken bis 4 m Wassertiefe können hierbei Porenwasserüberdrücke entstehen. Wird hingegen dieselbe Druckwechselbelastung bei einem Druck von 50 m Wassertiefe aufgebracht, so wird die Bodenluft soweit komprimiert, dass nahezu keine Druckdämpfung mehr stattfindet und dementsprechend auch keine Porenwasserüberdrücke mehr entstehen. Zur Beurteilung dieses Effektes auf die Filterstabilität sollen Versuche auf unterschiedlichen Druckniveaus durchgeführt werden. Neben der präzisen Steuerung der aufgetragenen Druckwechselbelastung sollen mit der neuen Anlage auch verschiedene Drücke sowie der Wasserdurchfluss durch die Anlage gemessen werden können. Hierbei können je nach Durchlässigkeit der eingebauten Bodenprobe unterschiedliche Messbereiche verwendet werden. Eine Skizze der neuen Versuchsanlage ist in Bild 1 dargestellt.

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

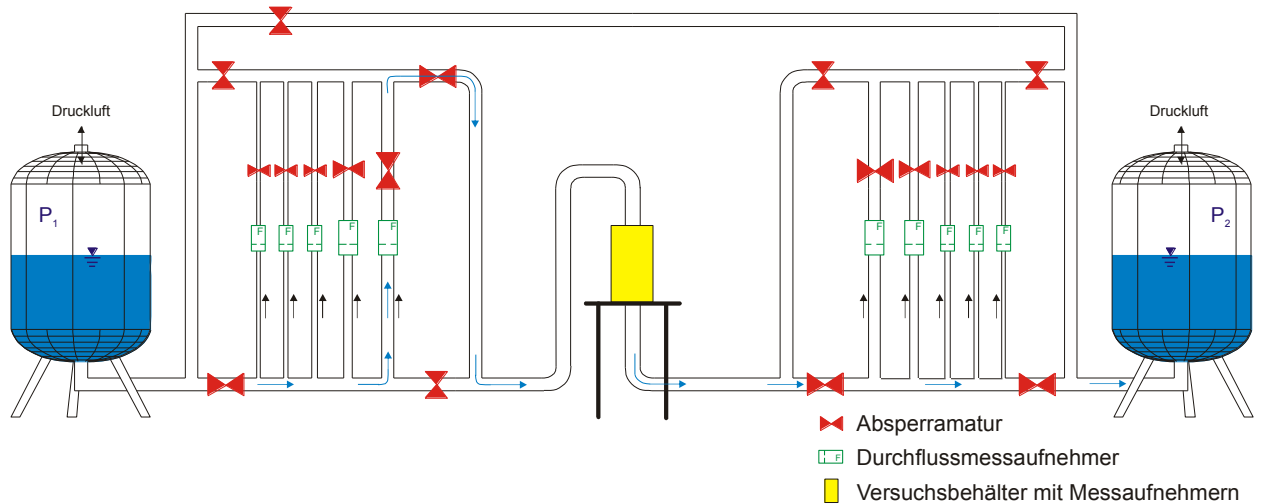


Bild 1: Skizze der neuen Wechseldurchströmungsanlage

3 Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurde die neue Anlage weiter aufgebaut, aufgrund der personellen Situation konnten die Arbeiten jedoch nicht abgeschlossen werden. 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. Weite Teile dieser Arbeiten wurden in 2012 mit einem u. a. hierfür eingestellten Elektrotechniker durchgeführt. Es ist nunmehr möglich, in den Drucktanks unterschiedliche Druckverläufe (Rechteck-, Sinus- und Dreiecksverläufe) zuverlässig und mit guter Genauigkeit im Druckbereich bis 9 bar zu fahren. Daher können in kürze erste Kalibrierversuche mit der derzeit vorhandenen Versuchszelle durchgeführt werden. Im Anschluss daran werden verschiedene 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:

2013: 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.

2014: Systematische Untersuchung unterschiedlicher Materialkombinationen.

Prüfung von Geotextilien als Grundlage für die Überarbeitung des MAG.

Laufzeit des Vorhabens von 2002 bis 2014.

Technisch-biologische Ufersicherungsmaßnahmen – Quantifizierung ihrer Belastbarkeit und Möglichkeiten ihrer Anwendung an Binnenwasserstraßen

Netzplan-Nr.: A39520410151

Projektleiter/in: Dipl.-Ing. P. Fleischer, Dr.-Ing. R. Soyeaux, Abteilung Geotechnik,
Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

E-Mail: petra.fleischer@baw.de, renald.soyeaux@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Um die Ufer von Binnenwasserstraßen dauerhaft vor Erosionen und anderen negativen Auswirkungen der hydraulischen Belastung aus Schifffahrt zu schützen, werden diese in der Regel mit technischen Deckwerken aus Steinschüttungen oder Spundwänden gesichert. Anwendungsgrundlage ist ein breites Regelwerk der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV). Seit Inkrafttreten der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie (WRRL) im Jahr 2000 sind bei allen Aus- und Neubaumaßnahmen sowie Unterhaltungsarbeiten an Wasserstraßen neben den technischen Anforderungen auch ökologische Gesichtspunkte zu berücksichtigen. Naturnähere Ufersicherungen unter Einbeziehung von Pflanzen sind als Alternative zur klassischen Steinschüttung gefragt. Für deren Einsatz an Wasserstraßen gibt es bisher allerdings noch zu wenig Erfahrungen und vor allem keine Regelwerke. Aus diesem Grund werden seit einigen Jahren in einem gemeinsamen Forschungsprojekt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) und der Bundesanstalt für Gewässerkunde (BfG) Untersuchungen zur hydraulischen Belastbarkeit und ökologischen Wirksamkeit technisch-biologischer Ufersicherungen mit dem Ziel durchgeführt, Anwendungsempfehlungen und Bemessungsgrundlagen für deren Einsatz an Binnenwasserstraßen zu erarbeiten.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

Technisch-biologische Ufersicherungsarten, die sich aufgrund der Untersuchungen als geeignet für die Anwendung an Wasserstraßen erweisen, werden in einem Regelwerk zusammengestellt. Deren Belastbarkeit wird speziell hinsichtlich der besonderen Uferbelastungen infolge Schifffahrt, 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 und praktischer Erfahrungen erster lokaler Anwendungen in der WSV,
- Durchführung von Naturmessungen und Untersuchungen in bestehenden und neu anzulegenden Versuchsstrecken, Durchführung von Naturversuchen, Erfassung aller technischen und biologischen Randbedingungen einschließlich der hydraulischen Uferbelastungen infolge Schifffahrt,
- Begutachtung und Bewertung des Zustandes und der Entwicklung alternativer Ufersicherungen mit Pflanzen hinsichtlich Uferschutz sowie ökologische Bewertung der Vegetation und Fauna,

- Ermittlung der Belastbarkeit der in den Versuchsstrecken und Naturversuchen getesteten unterschiedlichen Ufersicherungsarten,
- Auswertung der Gesamtergebnisse, Formulierung von Empfehlungen und Bemessungsansätzen.

3 Ergebnisse

Alle bisher bereits vorliegenden Ergebnisse sind auf dem zur Thematik der alternativen Ufersicherungen an Wasserstraßen eingerichteten gemeinsamen Internet-Fachportal der BAW und BfG veröffentlicht (<http://ufersicherung.baw.de/de/index.html>). Der erste Bericht (BAW, BfG 2008) beinhaltet die Ergebnisse einer internationalen Literaturrecherche und einer Umfrage in der WSV zu bereits bestehenden ersten Erfahrungen mit alternativen Ufersicherungen. Im zweiten Bericht (BAW, BfG 2010) sind die Ergebnisse einer umfangreichen Detailuntersuchung in einer bereits vor etwa 20 Jahren angelegten Versuchsstrecke an der Mittelweser dargestellt. 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 bildete auch 2012 der Naturversuch am Rhein (km 440,6 bis km 441,6), bei dem am rechten Ufer neun verschiedene Varianten technisch-biologischer Ufersicherungsmaßnahmen unter Wasserstraßenbedingungen getestet werden. Träger der Maßnahme ist das WSA Mannheim. In fünf Abschnitten wurde die vorhandene Steinschüttung etwa oberhalb Mittelwasser entfernt und durch neue überwiegend pflanzliche Maßnahmen ersetzt, in einem Abschnitt blieb das Ufer weitestgehend ungesichert. In vier Abschnitten erfolgten ökologische Aufwertungen der weiterhin mit Wasserbausteinen gesicherten Böschung. In einem schriftlichen Bericht (BAW, BfG, WSA 2012) wurden die einzelnen Bauweisen dokumentiert und das Monitoringprogramm detailliert erläutert (Kurzfassung im BAW-Brief 5/2012). Nach Bauabschluss Ende 2011 ist 2012 gekennzeichnet durch die kritische Anfangsphase der pflanzlichen Ufersicherungen, in der sich die Wurzeln erst entwickeln müssen. Die Anfangsstabilität muss deshalb zum Teil durch ausreichende Befestigungen und temporäre Filtermatten gewährleistet werden. Anfang des Jahres traten verschiedene Hochwasser auf, die die neuen Ufersicherungen zusätzlich zu den hydraulischen Einwirkungen infolge Schifffahrt belasteten. Im Rahmen des Monitorings wurden 2012 folgende Aktivitäten durchgeführt:

- Regelmäßige Uferinspektionen (Begutachtung der einzelnen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich Pflanzenentwicklung, Schäden und insbesondere Uferstabilität),
- Regelmäßige Fotodokumentationen (Einzelfotos während der Uferinspektionen, Panoramafotos vom gegenüberliegenden Ufer aus zur Darstellung der zeitlichen Entwicklung),
- Messung der hydraulischen Uferbelastung infolge Schifffahrt bei höheren Wasserständen im Bereich der neuen Ufersicherungen (14. bis 18.06.2012),
- Messungen von Porenwasserüberdrücken im Boden unterhalb der Spreitlagen im Versuchsfeld 3 zur Beurteilung der Bodenreaktion bei hydraulischer Belastung infolge Schifffahrt (Absunk) (06/2012 und 10/2012),
- Vermessung von ausgewählten Querprofilen zur Quantifizierung von Böschungsveränderungen,
- Verschiedene Vegetationsaufnahmen zur Beurteilung der Pflanzenentwicklung hinsichtlich Gewährleistung Uferschutz (BfG, Uni Wien),
- Ausgrabung im Bereich der Spreitlagen (Versuchsfeld 3) zur Beurteilung der Wurzeln nach der ersten Vegetationsperiode (im Rahmen einer Masterarbeit der Uni Hannover (10/2012)),
- Erste faunistische Untersuchungen (Elektrobefischung 05/2012) für ökologische Bewertungen.

Nach Auswertung der Monitoringergebnisse werden diese einschließlich der Kosten für die einzelnen Ufersicherungsarten in einem Bericht zusammengestellt. Eine erste, allerdings noch nicht endgültige Beurteilung der verschiedenen Bauweisen wird auf dieser Grundlage möglich sein.

Auch wenn in einzelnen Versuchsfeldern Schäden - z. B. durch unzureichende Befestigungen - nach den ersten Hochwasserereignissen aufgetreten sind, die lokale Sanierungen erforderlich machten, haben die neuen Ufersicherungen insgesamt bisher allen Beanspruchungen weitestgehend standgehalten. Wie erwartet verhalten sich Ufersicherungen mit einem bestimmten Flächengewicht wie die ca. 30 cm dicken, mit Steinen der Klasse CP_{45/125} gefüllten Röhrichtgabionen (Versuchsfeld 5) stabiler als reine Pflanzmatten (Versuchsfeld 7). Die sehr gut entwickelten Weidenspreitlagen haben bereits nach der ersten Vegetationsperiode ein verzweigtes Wurzelsystem mit Wurzellängen bis ca. 60 cm im

Boden entwickelt (Bild 1). Eine genaue Auswertung dazu erfolgt derzeit im Rahmen einer Masterarbeit. Über die im Rahmen des Forschungsprojektes A39520470002 parallel durchgeführten Modell- und Scherversuche kann die Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens im Bereich der Spreitlagen anhand des Durchwurzelungsgrades ermittelt werden - als Grundlage für die Beurteilung der Uferstabilität.



Bild 1: Weidenspreitlagen nach dem Einbau Ende 2011 (links), im August 2012 (mitte), Wurzelfreilegung im November 2012 (rechts)

Eine endgültige Einschätzung der einzelnen Bauweisen kann erst nach mehreren Vegetationsperioden gegeben werden. Das Monitoring zur Bewertung der unterschiedlichen technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen hinsichtlich der technischen (Gewährleistung der Uferstabilität) und ökologischen Wirksamkeit sowie des erforderlichen Unterhaltungsaufwandes wird aus diesem Grund zunächst bis 2016 durchgeführt. Im Ergebnis des Naturversuchs werden wichtige Erkenntnisse zur Anwendung alternativer technisch-biologischer Ufersicherungen am Rhein, aber auch an anderen Wasserstraßenabschnitten erwartet.

Um die bisherigen Erfahrungen bereits vorher der WSV zur Verfügung zu stellen, wurde 2012 begonnen, Kennblätter für die einzelnen Bauweisen, die für Wasserstraßen aus heutiger Sicht geeignet erscheinen, zu erarbeiten. Ein erstes Kennblatt zu „Weidenspreitlagen“, das Konstruktion, Einbauhinweise, Belastbarkeit und dementsprechende Anwendungsempfehlungen, Kosten usw. beinhaltet, ist bereits unter http://ufersicherung.baw.de/de/fuer_die_praxis/index.html veröffentlicht. Weitere folgen 2013.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013 wird das Monitoring im Rahmen des Naturversuchs weitergeführt. Parallel dazu werden die Untersuchungen in weiteren ausgewählten bestehenden Wasserstraßenabschnitten mit alternativen Ufersicherungen fortgesetzt. Es wird eine erneute Umfrage innerhalb der WSV gestartet, mit der die aktuellen technisch-biologischen Ufersicherungsmaßnahmen, die in den letzten 8 Jahren im Rahmen von Ausbau, Sanierung und Unterhaltung ausgeführt wurden, erfasst werden sollen. Ziel ist es, einen breiten Erfahrungsaustausch zu initiieren, die Ergebnisse sollen in die zu erarbeitende Empfehlung für die WSV einfließen. Durch Mitarbeit im DWA-Ausschuss 1.5/2.5 „Alternative Ufersicherungen“ und in der 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 4 Jahre in Anspruch nehmen.

Laufzeit des Vorhabens von 2004 bis 2013.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

- BAW, BfG (2006): Untersuchungen zu alternativen technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen, Teil 1: Veranlassung, Umfrage und internationale Recherche" BAW/BfG, Mai 2006
- BAW, BfG (2008): Untersuchungen zu alternativen technisch-biologischen Ufersicherungen an Binnenwasserstraßen, Teil 2: Versuchsstrecke Stolzenau/ Weser, km 241,550 – 242,300, Oktober 2008,
- BAW, BfG (2010): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Empfehlungen für die Ausführung der Ufersicherungen, 07.05.2010
- BAW, BfG, WSA (2012): Einrichtung einer Versuchsstrecke mit technisch-biologischen Ufersicherungen, Rhein-km 440,6 bis km 441,6, rechtes Ufer, Randbedingungen, Einbaudokumentation, Monitoring, 25.01.2012

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 (Ufereinfassung 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

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

Ergänzend wurden erste numerische Berechnungen zur Eindringung eines Pfahlelements in den Ton und den Sand durchgeführt, um die Verwendbarkeit der Parameter zu prüfen.

Parallel wurde von der TUHH der Versuchsstand zur Durchführung der Modellversuche weiter konzipiert.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

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.

In 2013 werden die Modellversuche und die numerischen Berechnungen durchgeführt.

Laufzeit des Vorhabens von 2006 bis 2015.

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.

Filterstabilität grober Gesteinskörnungen

Netzplan-Nr.: A3952047001

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

E-Mail: juergen.stein@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Eine Standard Bauweise zur Sicherung der Böschungsufer an den Bundeswasserstraßen ist die Schüttung loser 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 neue Merkblatt ist kurz vor der Fertigstellung.

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. Prinzipiell soll gezeigt werden, in wie weit in einem maßstabsgerechten Modellversuch eine Abbildung der Strömungsprozesse und Deckwerksverformungen möglich ist. Darauf aufbauend sollen Filterregeln für sehr grobe Gesteinskörnungen entwickelt und auf die Bemessung neuer Filterstufen für die neuen Wasserbausteinklassen der TLW 2003 angewendet werden.

2 Untersuchungsmethoden

Zur Erfassung der komplexen Strömungsverhältnisse und der daraus resultierenden Deckwerksverformungen werden großmaßstäbliche Modellversuche auf dem BAW Gelände durchgeführt. Bei einem Versuch wird ein Deckwerk bestehend aus Wasserbausteinen mit darunter liegendem Kornfilter in den Probekasten eingebaut. Dieser wird in einem Tauchbecken zur Simulation der Strömungs- und Wellenbelastung mit Hilfe eines Krans zyklische auf und ab bewegt.

Zur Erfassung der hydrodynamischen Belastung im Deckwerk ist der Probekasten in mehreren Ebenen mit Porendruckgeber, Erddruckkissen und Sonden zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit bestückt.

Zur Deckwerksbegutachtung kann der Kastennach den Versuchen an den Seitenwänden geöffnet werden. Zusätzlich hat er Sichtfenster zur Beobachtung von Umlagerungen des Filtermaterials während des Versuchs. Zur Bestimmung von Steinverlagerungen wird die Deckwerksoberfläche photographisch aufgenommen.

Zur Verifizierung der Modellversuche und numerischen Berechnungen ist geplant Messungen in situ durchzuführen. Dabei werden in ein Böschungsdeckwerk 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. Mit Hilfe numerischer Rechenverfahren soll der Strömungsprozess und die daraus resultierenden Belastungen auf das Deckwerk abgebildet 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 mehrere Berechnungsmethoden vorhanden sind. Auf Grund der Komplexität wurde an der BAW der Arbeitskreis Numerik gegründet, Der erste Schritt ist die Findung einer geeigneten Software, mit der die komplexen Strömungsbedingungen im Deckwerk unter Berücksichtigung der flüssigen und festen Phase simuliert werden können.

3 Ergebnisse

Im Tauchbecken der BAW wurden die ersten Tauchversuche mit eingebauten Wasserbausteinen, Kornfilter und Messtechnik durchgeführt. Es wurden etwa 100 Tauchzyklen gefahren. Ziel dieser Versuche war es, die Handhabung des Versuchsaufbaus und die Messtechnik zu testen. Das unten stehende Bild 1 zeigt auf der linken Seite den Einbau des Kiesfilters in den Versuchskasten und auf der rechten Seite das eingebaute Deckwerk bei einem Tauchversuch. Der Kornfilter ist in die unterste Lage der Wasserbausteine eingedrungen, wodurch sich die Deckschicht um mehrere Zentimeter gesetzt hat.



Bild 1: Einbau Kornfilter in den Versuchskasten (li.), Tauchvorgang mit Deckwerk (re.)

Die Setzung der Deckwerksoberfläche wurde mit Hilfe eines 3D-Scanners bestimmt. Das Bild 2 zeigt zwei Beispiele von durchgeführten Scans. Die großformatigen Wasserba werden gut abgebildet. Die Auswertung homogener Strukturen wie z. B der Kiesfilter wird zur Zeit getestet. Die aufgezeichneten Messdaten wurden ausgewertet. Die Druckmessungen zeigen plausible Ergebnisse. Die Messung der Strömungsgeschwindigkeiten müssen mit weiteren Versuchen validiert werden.

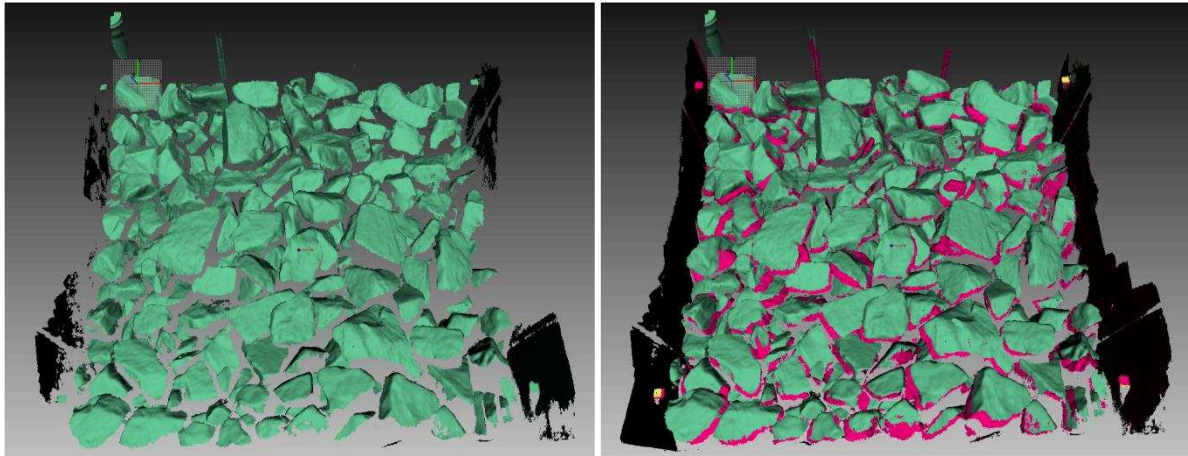


Bild 2: li: digitales Höhenmodell des Deckwerks, re: Differenzenbild vor und nach Versuch

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013:

- Durchführung weiterer Modellversuche
- Machbarkeitsstudie für die numerische Modellierung
- Auswertung und Interpretation der Modellversuche, Naturmessungen
- Vergleich der Ergebnisse mit den bekannten Filterregeln
- Ggf. Formulierung von weiterem Entwicklungsbedarf
- Erstellung eines Abschlussberichtes

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2013.

Technisch-biologische Ufersicherungen – Theorie und Modellversuche zur Belastbarkeit

Netzplan-Nr.: A39520470002

Projektleiterin: Dipl.-Ing. J. Eisenmann, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (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 (Netzplan-Nr. A39520410151) (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 A39520410151 eine Grundlage für die Entwicklung von Bemessungsregeln für technisch-biologische Ufersicherungen bieten.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchungen ist die theoretische und modelltechnische Erforschung der Wirkung technisch-biologischer Ufersicherungen hinsichtlich geotechnischer und hydraulischer Aspekte. Quantifizierungen der Belastungsresistenz technisch-biologischer Ufersicherungen gegenüber schiffsinduzierten hydraulischen Einwirkungen sollen stattfinden. Mit Hilfe von theoretischen Betrachtungen soll eine weitere Grundlage für Standsicherheitsnachweise geschaffen werden.

2 Untersuchungsmethoden

Hauptuntersuchungsmethoden sind Modell- und Laborversuche: Die Untersuchungen der geotechnischen Aspekte beinhalten die für die Standsicherheit maßgebenden Festigkeitsparameter des durchwurzelten Bodens. 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.

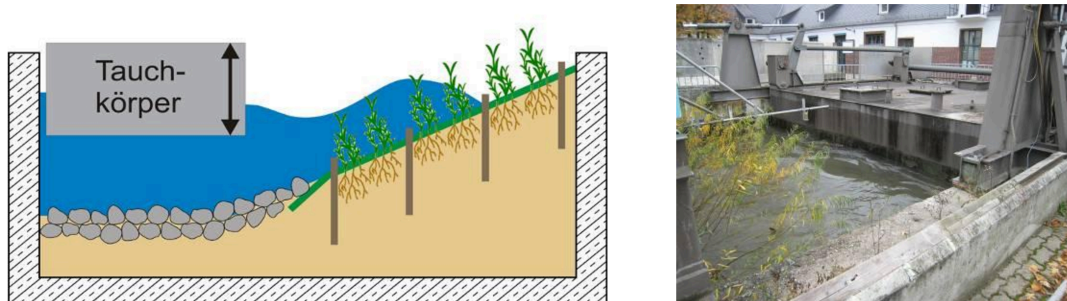


Bild 1: Systemskizze und Foto des Wellenbeckens mit einer technisch-biologischen Ufersicherung

3 Ergebnisse

2012 wurden die Modellversuche mit Weidenspreitlagen als Ufersicherung im Wellenbecken der BAW auf einer 1:3 geneigten Böschung sehr intensiv fortgesetzt. Die 2011 eingebauten Spreitlagen aus Korb- und Purpurweiden wurden in 7 Messkampagnen nach einer Anwachszeit von 53, 63, 66, 70, 73 und 77 Wochen in mehreren Zyklen hydraulisch durch Wellen und Absunk belastet. Dabei wurde die Belastungsintensität langsam gesteigert. Im letzten Versuch am 26.10.2012 erfolgte eine begrenzte Dauerbelastung mit den im Wellenbecken maximal möglichen Belastungen. Eine Vielzahl von Messgrößen - Wasserspiegellagen, Wellen- und Absunkgrößen, Porenwasserdrücke im Boden in verschiedenen Tiefen unter den Weidenspreitlagen, Verformungen der Böschungsoberfläche (über Ketteninklinometer und selbst entwickelte Neigungsmessketten) wurden aufgenommen. Alle Daten befinden sich noch in der Auswertung. Bereits jetzt kann jedoch festgestellt werden, dass die Spreitlagen alle Belastungen ohne größere Schäden aufnehmen konnten.

Parallel zu den Modellversuchen erfolgten Untersuchungen zum Wurzelwachstum der Weiden. Dazu war bereits im Mai 2011 ein spezielles Feld angelegt worden, in dem 2011 und 2012 abschnittsweise in verschiedenen Zeiten nach dem Einbau Wurzeln freigelegt und vermessen wurden. Dabei wurde festgestellt, dass sich bereits nach einer Vegetationsperiode ein relativ dichtes Wurzelwerk im Boden entwickelt hat. Nahe der Bodenoberfläche hat sich ein sehr feines fast flächiges System von Wurzeln gebildet, das bereits vor Erosion schützen kann (Bild 2). Bis zu ca. 60 cm lange Einzelwurzeln reichen in den Boden.



Bild 2: Wurzelausgrabung Weidenspreitlagen

Ein weiterer praktischer Versuch wurde durchgeführt, um zu prüfen, ob Weidenspreitlagen auch auf einem geotextilen Filter angewendet werden können, ohne das Wurzelwachstum zu behindern. Ein Geotextil ist zumindest temporär erforderlich, wenn die Weidenäste nicht flächig ohne Zwischenräume auf der Böschung verlegt werden können. In diesem Fall muss die Erosions- bzw. Filterstabilität in der Anfangsphase durch zusätzliche konstruktive Maßnahmen gewährleistet werden. Im November 2011 wurden Spreitlagen zu Vergleichszwecken auf einem Kunststoffvlies (300 g/m^2), auf einem biologisch abbaubaren Schafwollvlies (450 g/m^2) und ohne Vlies auf einem kiesigen Boden verlegt. Im Septem-

ber 2012 erfolgte die Begutachtung, in dem die Wurzeln ausgegraben wurden. Dabei zeigte sich eine ähnliche Wurzelbildung in den Feldern mit und ohne Geotextil. Das heißt, ein Kunststoffgeotextil in der verwendeten Dicke behindert die Wurzelbildung nicht. Das Schafwollvlies hatte sich im Zeitraum von 10 Monaten fast vollständig biologisch abgebaut. Aufgrund des sehr schnellen Abbaus ist es als temporärer Filter an Wasserstraßen nicht geeignet.

Um die Standsicherheit der Uferböschung mit Spreitlagen in Abhängigkeit vom Wurzelwachstum beurteilen zu können, wird die Korrelation zwischen dem Durchwurzelungsgrad und der Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens untersucht und quantifiziert. Dazu wurden im März 2012 Weidenspreitlagen in einzelnen 1 m hohen Versuchskästen mit einer Grundfläche von 50 cm x 50 cm eingebaut (Bild 3). Diese sind so konzipiert, dass eine Abscherung des durchwurzelten Bodens in verschiedenen Tiefen unter der Bodenoberfläche erfolgen kann. Die Scherfestigkeit des durchwurzelten Bodens wurde bzw. wird nach 6 und 12 Monaten in den jeweils verschiedenen Tiefen unter der Bodenoberfläche im Großscherversuch ermittelt. Vorher waren umfangreiche Versuche im Großschergerät mit verschiedenen Böden ohne Wurzeln zur Festlegung der Versuchsdurchführung und –auswertung erforderlich. Auch bauliche Veränderungen am Gerät waren notwendig. Die Durchführung und Auswertung der Scherversuche am durchwurzelten Boden erfolgen 2013.

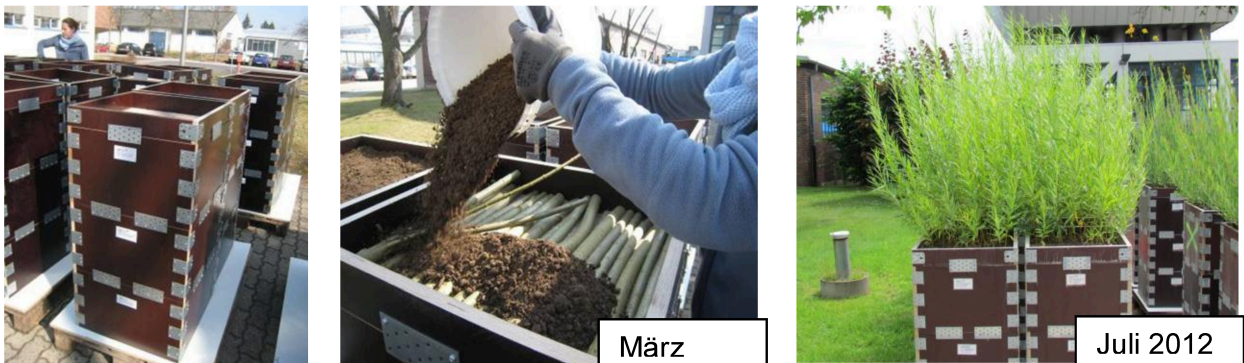


Bild 3: Versuchskästen zur Anzucht von Weidenspreitlagen für Scherversuche

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2013: – Auswertung und Interpretation der Modellversuche im Wellenbecken
 – Durchführung und Auswertung der Scherversuche am durchwurzelten Boden
 – Entwicklung von Standsicherheitsnachweisen für technisch-biologische Ufersicherungen
 – Ggf. Formulierung von weiterem Entwicklungsbedarf
 – Erstellung eines Abschlussberichtes

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2013.

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): Ingenieurbiologische Bauweisen an Fließgewässern- Grundlagen zu Bau, Belastbarkeit und Wirkungsweisen. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag
 Rauch, H.-P. (2006): Hydraulischer Einfluss von Gehölzstrukturen am Beispiel einer ingenieurbiologischen Versuchsstrecke am Wienfluss. Dissertation. Universität für Bodenkultur Wien. Band 63. Gutmann-Peterson

6 Veröffentlichungen

- Eisenmann, J., Fleischer, P. (2012): Möglichkeiten und Grenzen pflanzlicher Ufersicherungen an Wasserstraßen. Johann-Ohde-Kolloquium, BAW-Mitteilungen Nr. 95, 2012

Erosion von Dichtungstonen und bindigen Böden unter Strömungsbelastung

Netzplan-Nr.: A39520470003

Projektleiter: Dipl.-Ing. (FH) A. Schneider, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

E-Mail: achim.schneider@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

Mit Einführung der überarbeiteten ZTV-W, LB 210 im Jahr 2006 wurden gleichzeitig die Richtlinie zur Prüfung mineralischer Weichdichtungen im Verkehrswasserbau (RPW) zur Prüfung der Eignung von Erdstoffen zur Verwendung als Dichtungsbaustoff verankert. Zum Nachweis der Erosionsstabilität sind in dieser Richtlinie der Zerfallsversuch nach Endell und der Pin-Hole-Test aufgeführt. Für beide Verfahren gelten bisher keine wissenschaftlich abgesicherten Ausschlusskriterien. Ähnlich gelagerte Anwendungsfälle bzw. Materialuntersuchungen, z.B. aus dem Deponiebau liefern aufgrund der stark unterschiedlichen Einbausituation (Unter-Wasser-Einbau, Strömungsbelastung durch Schifffahrt bzw. auf Gewässersohlen) keine hinreichend übertragbaren Bewertungskriterien. Eindeutige und reproduzierbare Kriterien sind jedoch besonders im Hinblick auf länderübergreifende Ausschreibungsverfahren unerlässlich, um bei der Vergabe entsprechender Baumaßnahmen nachvollziehbare und gerichtlich nicht angreifbare Kriterien zur Verfügung zu stellen.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Eine Prognose zum Erosionsverhalten bindiger Böden ist bei vielen geotechnischen und hydraulischen Fragestellungen eine notwendige Eingangsgröße zur Beurteilung der Auswirkungen der hydraulischen Belastungen auf den hiervon betroffenen Boden. Ebenso ist die labortechnische d.h. versuchstechnische Abbildung dieses Verhaltens eine nicht hinreichend gelöste Fragestellung. Aus der Literatur sind einige Ansätze wie der Zerfallsversuch nach Endell 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 Versuchs-

parameter wie z.B. Einwirkdauer, Strömungsgeschwindigkeit, Probengröße etc. erforderlich. Sollte sich keine oder eine nicht ausreichende Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse abzeichnen, so werden die Untersuchungen auf die Ermittlung des Einflusses weiterer möglicher Parameter (Mineralbestand etc.) ausgedehnt. Werden nach einer eventuellen Modifikation d.h. Verbesserung der Untersuchungsweise auch weiterhin keine zufriedenstellenden Ergebnisse erzielt, folgt eine Erweiterung der Arbeiten auf die Entwicklung neuer Testverfahren. In diesem Zusammenhang wird beabsichtigt, das Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart mit entsprechenden Überströmversuchen zu beauftragen, da dort bereits aus vorhergehenden Studien eine entsprechende Versuchsanlage vorhanden ist.

3 Ergebnisse

In 2011 wurden erste Überströmversuche am Institut für Wasserbau in Stuttgart durchgeführt. In 2012 wurden in der BAW erste Vorversuche zum Zerfallsverhalten und zur Materialveränderung bzw. zur Reproduzierbarkeit der Ergebnisse durchgeführt. 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

2013:

- Durchführung von Laborversuchen
- Auswertung und Vergleich der Messergebnisse
- Eventuell Erweiterung des Versuchsprogramms auf andere Testverfahren

2014:

- Abschluss der Laboruntersuchungen
- Erstellung eines Abschlussberichtes
- Ggf. Formulierung von weiterem Entwicklungsbedarf

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2014.

Entwicklung des Zustands von Deckwerken bei Absenkung des technischen Standards

Netzplan-Nr.: A39520470004

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

E-Mail: jan.kayser@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Zur Förderung der Binnenschifffahrt in Deutschland ist es sinnvoll, eine weitestgehende Befahrbarkeit des Wasserstraßennetzes auch mit großen Binnenschiffen (GMS über 10 m Breite) zu ermöglichen. Dieses Ziel ist mit dem Ausbau vorhandener Wasserstraßen nach den „Richtlinien für Regelquerschnitte an Binnenschifffahrtskanälen“ des BMVBS mit Vertiefung, Verbreiterung und dementsprechend auch neuen, ausreichend bemessenen Böschungs- und Sohlensicherungen realisierbar. Dabei wird ein guter Standard für sichere, wirtschaftliche und unterhaltungsarme Deckwerke sowie hinsichtlich des Verhältnisses zwischen Gewässerquerschnitt und Schiffsgröße erreicht.

Aus ökologischen oder wirtschaftlichen Gründen ist dieser umfängliche Ausbau der Wasserstraßen jedoch nicht in allen Fällen sinnvoll oder durchsetzbar. Um trotzdem eine möglichst 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 (GGB)“ bemessen. Auf der Basis des GGB 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 GGB 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

In 2012 wurden Untersuchungen angestellt, inwieweit sich ein Schiffsverkehr simulieren lässt. Datengrundlage dazu waren Messungen am DEK, WDK, Berliner Nordtrasse und Silokanal. Die Simulation erfolgt in mehreren Schritten:

1. Auswertung des Schiffsverkehrs mit Feststellung von Korrelationen zwischen Ermittlung statistischer Kennwerte für die nachfolgenden bemessungsrelevanten Parameter

Schiffsparameter						Fahrverhalten	
Breite	Länge	Tiefgang Bug	Tiefgang Heck	Leistung Antrieb	Beladung voll/leer	Abstand Schiffsachse - Kanalmitte	Relative Schiffsgeschwindigkeit auf v_{krit}
B	L	t_{Bug}	t_{Heck}	P	Bel	A	v_{s,rel}

2. Auf der Grundlage der statistischen Verteilungen mit Hilfe von Zufallszahlen 10.000 Schiffe simulieren, Es zeigte sich, dass hierbei sind Korrelationen entsprechend dem nachfolgenden Diagramm zu berücksichtigen sind:

	B	L	t _{Bug}	t _{Heck}	Bel	v _{s,rel}	A	P
B		X	X	X	0	-	-	0
L			X	X	0	-	-	0
t _{Bug}				X	X	X	0	0
t _{Heck}					X	X	0	0
Bel						0	-	-
v _{s,rel}							0	0
A								0
P								

X= Korrelation vorhanden

- = keine Korrelation vorhanden

0 = keine Korrelation untersucht, da offensichtlich nicht vorhanden oder nicht maßgeblich

3. Für die simulierten Schiffe Bemessung mit GGBSoft durchführen
4. Vergleich der gemessenen und berechneten Bemessungsgrößen

Erste Ergebnisse, dass die Simulation des Schiffsverkehrs möglich ist. Die Ermittelten Bemessungsgrößen lagen i. d. R. über den gemessenen Größen, was im Sinne einer auf der sicheren Seite liegenden Bemessung ist.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013:

- Monte-Carlo-Simulation mit vorhandenen Daten (Entwicklung einer Software auf Basis VBA-Excel zur Erstellung und Berechnung von simulierten Bemessungsfällen in GGBSoft, Durchführung weiterer Simulationen)
- Modell zur Zustandsentwicklung von Deckwerken, voraussichtlich mit Markov-Ketten

2014:

- Messungen zur Zustandsentwicklung von Deckwerken an Wasserstraßenabschnitten
- Ggf. Expertenbefragung zur Erstellung von Entwicklungskurven für Deckwerke
- Entwicklung eines Modells ggf. mit softwaretechnischer Lösung zur Prognose des Zustands von Deckwerken, gekoppelt mit dem erforderlichen Unterhaltungsaufwand

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2014.

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

Statistische Auswertung von Erschütterungsemissionen

Netzplan-Nr.: A39520570002 (alt: A39560610020)

Projektleiter: Dipl.-Phys. R. Zierach, Abteilung Geotechnik, Referat Baugruddynamik (BD)

E-Mail: rahula.zierach@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Messergebnisse von sachgemäß und im erforderlichen Umfang durchgeführten Erschütterungsmessungen stellen bei Kenntnis der eingesetzten Technik und Energie der Erschütterungsquellen ähnlich wertvolle Aufschlüsse wie Bohrungen oder Sondierungen für die untersuchten Baugrundbereiche dar. Diese Ergebnisse gilt es für weitere Aufgaben der WSV zu nutzen. Nutzbare Veröffentlichungen darüber sind kaum vorhanden, da diese Kenntnisse einen Teil des „Know-how“ der einschlägigen Institutionen ausmachen. Die BAW verfügt inzwischen über große Datenmengen von Erschütterungsmessungen bei Baumaßnahmen an Wasserstraßen.

1.2 Bedeutung für die WSV

Auf Baustellen der WSV ist die Nutzung erschütterungsintensiver Bauverfahren wie Rammen, Vibrationsrammen, Vibrationsverdichten, Sprengen, Meißeln u. ä. nach wie vor unverzichtbar. Auf Grund der z. T. anzutreffenden Erschütterungsempfindlichkeit moderner Produktionsanlagen und zunehmender Sensibilität von Menschen in Wohngebäuden gegenüber Erschütterungen sind in der Vorbereitung von Baumaßnahmen immer häufiger auch erschütterungsärmere Schwingungsquellen wie z.B. Schiffs-, Baustellen- und Straßenverkehr zu berücksichtigen. Zuverlässige Erschütterungsprognosen können entscheidende Hinweise für die Auswahl zulässiger Bauverfahren, für die Fahrweise (z.B. Drehzahl von Vibrationsrammen) von Baumaschinen sowie für Art und Umfang von Beweissicherungsmaßnahmen bei erschütterungsintensiven Baumaßnahmen liefern.

1.3 Untersuchungsziel

In dem FuE-Vorhaben sollen die in vielen Einzelaufgaben erarbeiteten und für Erschütterungsgutachten genutzten Messdaten der BAW in Abhängigkeit vergleichbarer Parameter aufbereitet und für Prognosen zur Verfügung gestellt werden. Ziel dieser Untersuchungen ist ein experimentell gesichertes Prognoseverfahren für Bauwerks-, Bauteil- und Bodenerschütterungen im Umfeld von erschütterungsintensiven Baumaßnahmen um eine Verbesserung der Zuverlässigkeit, Schnelligkeit und Anwendungsbreite künftiger Erschütterungsprognosen zu erreichen.

2 Untersuchungsmethoden

Die gesammelten Erschütterungsmessdaten von Rammungen, Sprengungen, Meißel- und Verdichtungsarbeiten u. a. werden in Abhängigkeit vom Abstand zur Erschütterungsquelle, von der eingesetzten Energie, von Boden- und Bauwerkseigenschaften sowie gegebenenfalls von weiteren Einflussgrößen, wie z. B. Bohlenlänge und Rüttelfrequenz statistisch ausgewertet. Die vorliegenden Messdaten werden zusammen mit den vorhandenen Angaben aller relevanten Parameter elektronisch archiviert, systematisiert und statistisch ausgewertet. Das Problem der Erschütterungsausbreitung wird dabei in drei Teilkomplexen untersucht, der Erschütterungserzeugung (System Baumaschine-Boden), der Erschütterungsausbreitung (System Boden-Boden) und der Erschütterungsübertragung (System Boden-Bauwerk-Bauteil). Dabei sollen sowohl allgemeine Zusammenhänge (z. B. Bauwerkserschütterungen pro eingesetztem Energiebetrag in Abhängigkeit vom Abstand, unabhängig von Bauwerksart und Baugrund) als auch detaillierte Zusammenhänge (z. B. Erschütterung je Energiebetrag in Abhängigkeit vom Abstand für schwere massive Bauwerke in Sandböden) herausgearbeitet werden. Im ersten Fall erhält man über den Mittelwert und die Standardabweichung einen schnellen Überblick über die im Mittel und mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit (z. B. 95 % und 99 %) maximal möglichen Erschütterungen auch ohne Kenntnis des aktuell vorhandenen Baugrundes. Im zweiten Fall können bei Kenntnis bestimmter Parameter des Bauwerks und des Baugrundes genauere

re Angaben mit reduziertem Streubereich erhalten werden. Beide Fälle sind für die praktische Arbeit sinnvoll und notwendig.

3 Ergebnisse

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

Um die durch regelmäßige Messungen ständig wachsenden Datenbestände besser handhaben zu können, wurde eine Software für die Erfassung, Analyse, Archivierung und Prognose von Erschütterungsdaten erarbeitet. Inzwischen liegt die 10. überarbeitete Version dieser Software vor. Es sind Module für Schlagrammungen, Vibrationsrammungen, hydraulische Pressen, Meißelarbeiten, Verdichtungsarbeiten, Sprengungen sowie Erschütterungen aus Schiffsverkehr und durch herab fallende Massen enthalten. Die Erfassung und Auswertung von Messdaten konnte damit insbesondere hinsichtlich der Korrelationen zu Verfahrens-, Boden- und Bauwerksparemtern 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.

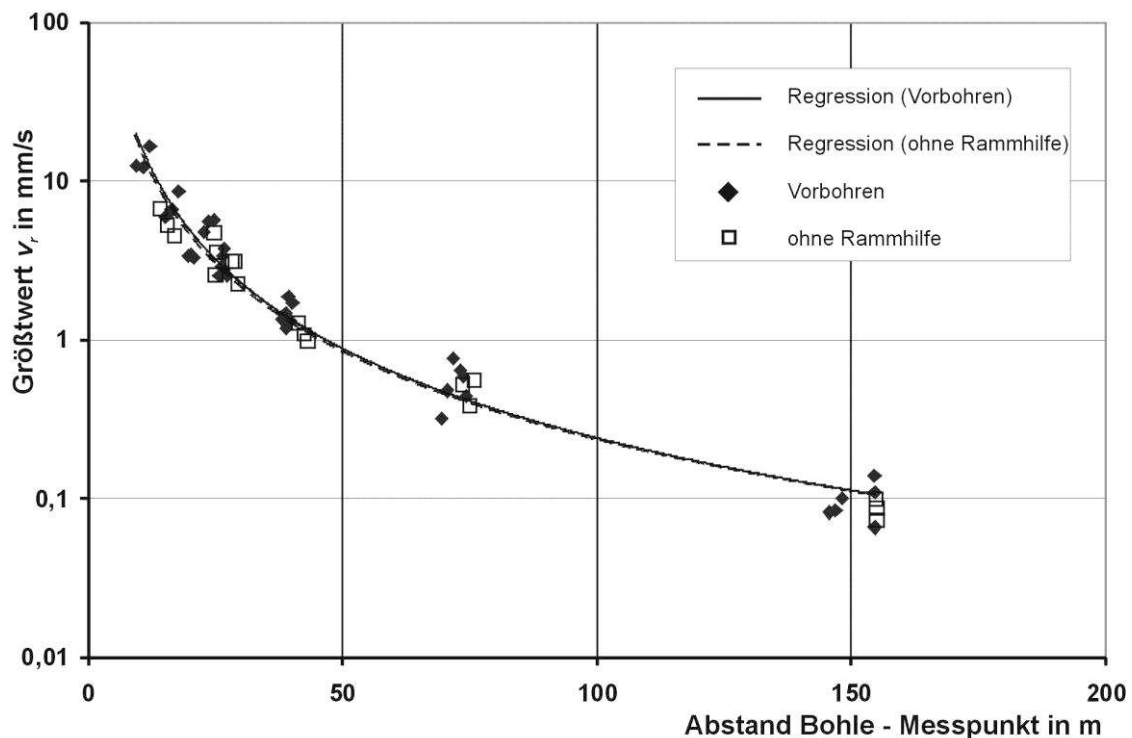


Bild 1: Größtwerte der Bodenschwingungen v_i je gerammter Spundbohle bei Vibrationsrammung

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

Geplanter weiterer Bearbeitungszeitraum ist bis zum 31.12.2014 vorgesehen.

Im Jahr 2013 werden weitere Verbesserungen und Anpassungen des entwickelten Prognoseprogramms vorgenommen.

Im Jahr 2014 werden die Ergebnisse in einem Abschlussbericht zusammengefasst.

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

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 2012 fortgeführt. Erst im Dezember 2012 traten am Niederrhein Wasserstände auf, die es gestatteten ADCP-Messungen in Vorlandbereichen durchzuführen. In diesem Jahr wurde für die HW-Messungen ein weiterer neuer Flussabschnitt Emmericher Ward erkundet. In diesem Abschnitt plant der NABU Deutschland z. Zt. eine Nebenrinne und die Pflanzung bzw. Tolerierung von größeren Auewaldflächen. Die BAW begleitet die Planungen des NABU und unterstützt diesen durch mathematisch-numerische Modelluntersuchungen, bei denen die im Rahmen des FuE-Projektes implementierten Rauheitsgesetze für über- und durchströmte Vegetation zum Einsatz kommen. Der Bereich Emmericher Ward ist unter zwei Aspekten für die Durchführung von Naturuntersuchungen interessant: Zum einen werden hier Veränderungen an der Vegetation vorgenommen deren Auswirkungen auf den Strömungswiderstand durch die im Rahmen des begleitenden Monitorings erfasst werden sollen. Zum anderen gestattet der Bereich auch bereits bei niedrigeren Hochwasserabflüssen die Durchführung von ADCP-Messungen.

Das Hochwasser um Weihnachten 2012 bot nun eine erste Gelegenheit Strömungsmessungen im Vorlandbereich des Emmericher Ward zu realisieren. An zwei Tagen erfolgten ADCP-Messungen durch die Aachener Kooperationspartner; am 21.12. wurden 44 und am 28.12. weitere 48 Einzelprofilmessungen durchgeführt. Einen Eindruck von den Messungen am 21.12. bei Nebel vermittelt Bild 1.

Tabelle 1: Überblick über die im Jahr 2012 durchgeführten Messungen

Datum	Ort	Messgröße
21.12.2012	Emmericher Ward	Fließgeschwindigkeit, ADCP-Messungen
28.12.2012	Emmericher Ward	Fließgeschwindigkeit, ADCP-Messungen



Bild 1: Foto aus dem Bereich Emmericher Ward (Rh-km 854,5) - ADCP-Messungen am 21.12.2012

Im Rahmen der Zusammenarbeit mit der BfG in dem BfG-Forschungsprojekt zur Vegetationserfassung aus Fernerkundungsdaten (LIDAR und Infrarotbilder) haben die beiden beauftragten Institute des KIT, Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) und Wasser und Gewässerentwicklung (IWG), erste Prototypen vorgestellt, um auf der Basis von LIDAR-Daten eine Vegetationszonenklassifizierung vorzunehmen.

Am 1. und 2. März 2012 fand die Sitzung der DWA-Arbeitsgruppe WW-3.1 in der BAW Karlsruhe statt. Im Rahmen der AG soll eine Schrift über „Hydraulische Berechnung von Fließgewässern mit Vegetation“ entstehen, die das inzwischen veraltete Merkblatt 220 des DVWK ablösen und auf den aktuellen Stand von Forschung und Technik bringen soll. Durch die Mitarbeit der BAW in dieser Arbeitsgruppe und die sich daraus ergebenden Kontakte erhält auch das hier skizzierte FuE-Vorhaben wichtige Impulse und Anregungen für die weiteren Untersuchungen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013 - 2016: Fortführung der bestehenden Kooperation mit dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft der RWTH Aachen, dem Aachener Ingenieurbüro *valitec simulations* sowie der Bundesanstalt für Gewässerkunde, Referate M5 Geodäsie und U3 Vegetationskunde.
 Umfassende Sichtung, Auswertung und Dokumentation der bisherigen Arbeiten im FuE-Vorhaben.

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2016.

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 2012 wurden die Untersuchungsziele in 4 Teilprojekten weiter verfolgt.

1. Im Rahmen einer Kooperation mit der EDF und der RWTH Aachen wurde das algorithmische Differenzieren (AD) für das TELEMAC Programmsystem weiter vorangetrieben. Mit Hilfe von AD wurde eine Zuverlässigkeitsanalyse für ein Projektbeispiel und eine automatische Kalibrierung für ein Prinzipbeispiel durchgeführt.
2. Das neu entwickelte Mehrschichtenmodell für das Sedimenttransportmodul Sisyphe des Programmsystems TELEMAC wurde in einer Masterarbeit anhand von Rinnenversuchen weiter validiert.
3. Die Anwendbarkeit eines groben zweidimensionalen (2D) morphodynamischen Modells im Vergleich zu einem eindimensionalen (1D) Modell wurde in einer Masterarbeit untersucht.
4. Anhand von Laboruntersuchungen an einer 80 m langen Rinne mit fester Sohle und verschiedenen Einbauten 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.

3 Ergebnisse

1. Eine erste vielversprechende automatische Kalibrierung des Rauheitsbeiwertes erfolgte mit der algorithmisch differenzierten Version von Sisyphe, die durch den AD-enabled NAG Fortran compiler erzeugt wurde. Mit einem einfachen Rinnenmodell wurde ein Zwillingsversuch durchgeführt. Dabei wurde zunächst ein Simulationslauf mit 48 Rauheitszonen als Nullversuch deklariert (Bild 1 links). Anschließend wurden die Rauheiten im gesamten Gebiet auf konstant $80 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gesetzt. Die AD Version von Sisyphe im adjungierten Modus war in der Lage innerhalb von 161 Optimierungsschritten (Methode der kleinsten Quadrate) die vorherige Rauheitsbelegung mit einer Genauigkeit kleiner 10^{-7} (Residuum im Bereich der Rechnergenauigkeit) zu erreichen (siehe Bild 1 rechts). In Zukunft soll solch eine automatische Kalibrierung die Modellierer insbesondere bei der Verwendung von morphodynamischen Modellen und ihren zahlreichen zu kalibrierenden Parametern unterstützen. [Kopmann, Merkel, Riehme 2012]

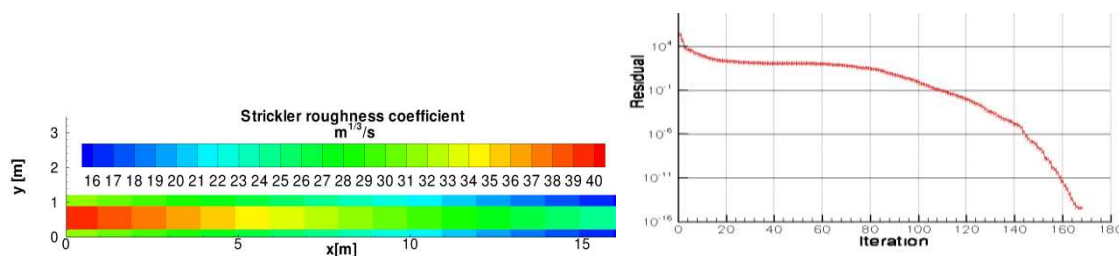


Bild 1: 48 Rauheitszonen (links) als Zielfunktion und die Entwicklung des Residuums für die Optimierungsmethode der kleinsten Quadrate (rechts) bis zum Erreichen dieser 48 Rauheitszonen ausgehend von einem konstanten Wert

2. Die Erosionsversuche von Günter wurden zur Validierung des neuen Mehrschichtenmodells herangezogen. Dabei wurde das klassische Mehrschichtenmodell von Hirano-Ribberink mit dem neuen kontinuierlichen Ansatz verglichen unter Verwendung von unterschiedlich großen aktiven Schichten. Die aktive Schicht wurde entweder konstant in unterschiedlichen Dicken angenommen oder dynamisch berechnet mittels fünf verschiedenen Formulierungen. Das neue Mehrschichtenmodell unter Verwendung einer dynamischen Schichtdicke zeigt leichte Vorteile gegenüber dem klassischen Modell, die vor allem in der weniger aufwändigen Kalibrierung bestehen. Allerdings muss die Stabilität der aktuellen Implementierung noch weiter erhöht werden. Bild 2 zeigt den Vergleich der beiden Modelle für eine nach Malcherek dynamisch berechnete aktive Schicht. [Anleu, 2012] Weitere Validierungen des neuen Mehrschichtenmodells und Anwendungen auf Projektbeispiele sind geplant.

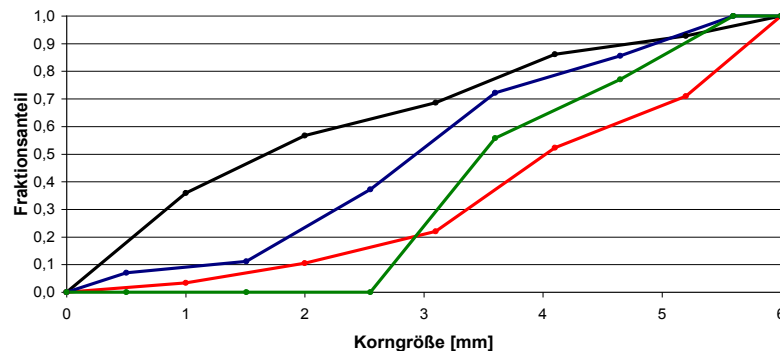


Bild 2: Gemessene (rot) und berechnete (grün: klassisches Mehrschichtenmodell, blau: neues Mehrschichtenmodell) Kornverteilung nach Versuchsende im Vergleich zur Anfangsverteilung (schwarz)

- Die Verwendung eines groben 2D numerischen Modells im Vergleich zu einem 1D Modell wurde anhand eines 50 km langen Oderabschnitts für einen Zeitraum von 21 Jahren untersucht. Die 2D morphodynamischen Simulationen der 21 Jahre benötigten mit dem Programm TELEMAC2D und SISYPHE 34 h Rechenzeit auf 96 Prozessoren des Computerservers der BAW. Das eindimensionale Modell HEC-6 benötigte dafür nur etwa 10 min. Trotzdem kann eine 2D Berechnung für diese Modellgröße und Zeitspanne ohne weitere Strategien zur Rechenzeitverkürzung in einer erträglichen Rechenzeit als Erfolg angesehen werden. [Sadid, 2013] Weitere Untersuchungen mit Gittervariationen und Strategien zur Rechenzeitverkürzung sollen zeigen, ob die Verwendung von zweidimensionalen Modellen auch für großräumige und langfristige Fragestellungen in Zukunft effizient möglich ist.
- Der Einfluss eines Deckwerkverbaus in einer Bühnenstrecke auf den Wasserspiegel konnte mit den beiden dreidimensionalen Simulationsverfahren TELEMAC und UnTRIM in guter bis sehr guter Genauigkeit berechnet werden. Die Verwendung der hydrostatischen Druckapproximation führt insbesondere bei dem Verfahren TELEMAC3D zu erheblich schlechteren Ergebnissen. [Baron, 2013]

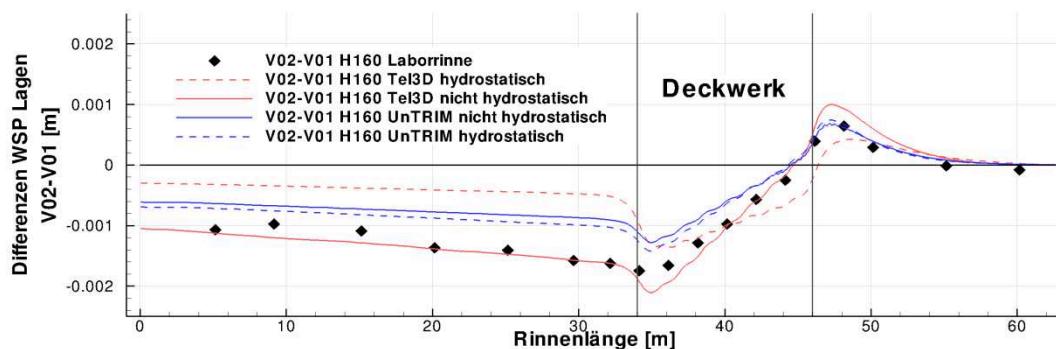


Bild 2: Vergleich der gemessenen (schwarz) Wasserspiegeldifferenzen infolge eines Deckwerkverbaus mit berechneten von TELEMAC3D (rote Linien) und UnTRIM (blaue Linien) mit (gestrichelte Linien) und ohne Berücksichtigung der hydrostatischen Approximation

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Entsprechend der genannten Untersuchungsschwerpunkte werden die folgenden Arbeitsschritte verfolgt:

- Anwendung der algorithmischen Differenzierung auf ein Projektbeispiel
- Weiterentwicklung der algorithmischen Differenzierung zur Zuverlässigkeitsanalyse für den parallelen adjungierten Modus für automatische Kalibrierung und Optimierungsaufgaben

- Erstellung eines Anwenderhandbuchs zum Einsatz von Methoden der Zuverlässigkeitsanalyse für numerische Modelle zur Strömungs- und Sedimenttransportmodellierung im Flussbau
- Validierung und Weiterentwicklung der bestehenden FT-Modelle
- Abschlusskolloquium

Laufzeit des Vorhabens von 2002 bis 2013.

5 Literatur

- Anleu F., R. (2012): Validation of a New Vertical Sorting Model and Sediment Transport Approach in the Sisyphus Module of the TELEMAC Software, on the Basis of Laboratory Models with Multigrain Sediment, Masterarbeit Karlsruher Institut für Technologie
- Baron, M. (2013): Kalibrierung und Validierung der numerischen Verfahren Telemac und UnTRIM anhand einer Laborrinne, Abschlussbericht zum BAW Auftrag „Begleitende mehrdimensionale numerische Modellierung von Rinnenversuche“
- Kopmann, R., Merkel, U., Riehme, J. (2012): Using Reliability Analysis in Morphodynamic Simulation with TELEMAC-2D / SISYPHE, Proceedings of the XIXth Telemac Users Club, Wallingford, 18.-19.10.2012, pp. 119-126
- Merkel, U., Kopmann, R. (2012): Continuous Vertical Grain Sorting for TELEMAC & SISYPHE v6p2, Sisyphus, Proceedings of the XIXth Telemac Users Club, Wallingford, 18.-19.10.2012, pp. 9-18
- Sadid, N. (2013): Hydro-morphodynamic modelling using a coarse 2D model in comparison to results from a 1D model for a 70km long Odra stretch, Masterarbeit Universität Stuttgart

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. Bei extremen Niedrigwasserabflüssen ist eine zunehmende Beeinträchtigung der Schifffahrt festzustellen, wie dies beispielsweise während des Niedrigwassers 2003 zu beobachten war. Einerseits reduziert sich in solchen Fällen die maximal mögliche Abladetiefe, was unmittelbare Folgen für die Wirtschaftlichkeit des Transports per Schiff hat. Andererseits kommt es aber auch zu Breitereinschränkungen in der Fahrrinne, die durch Untiefen in der Fahrrinne verursacht werden. Betroffen hiervon wären 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 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 Modelldiskretisierung durchzuführen. In diesem Zusammenhang sind geeignete Strategien zu identifizieren, mit welchen morphodynamische Langzeitsimulationen in hinreichender Prognosequalität bei vertretbaren Rechenzeiten auf den zur Verfügung stehenden Großrechnern realisierbar sind.

1.2 Bedeutung für die WSV

Aus dem Projekt resultieren Aussagen, mit welchem Aufwand welche Verbesserungen für die Schifffahrt bei klimabedingt möglicherweise reduzierten Niedrigwasserständen erzielt werden können. Damit stehen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) frühzeitig Anpassungsoptionen als Antwort auf die Auswirkungen eines möglichen Klimawandels zur Verfügung, mit welchen die Leistungsfähigkeit des Transportträgers Binnenschifffahrt auch bei extremen Niedrigwasserabflüssen erhalten werden kann. Erkenntnisse, welche aus den Modelluntersuchungen resultieren, finden bereits heute Eingang in das aktuelle WSV-Projekt „Abladeoptimierung 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. Auf einer Schwachstellenanalyse aufbauend werden erforderliche Ausbaumaßnahmen konzipiert und hinsichtlich ihrer Eignung bewertet. Abschließend ist der Unterhaltungs- und Regelungsaufwand hinsichtlich des Gewinns für die Schifffahrt als Grundlage für eine Kosten-Nutzen-Analyse zu ermitteln.

2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungen im Rahmen des Projektes werden zunächst exemplarisch für die Pilotstrecke Ober-/Mittelrhein von Mainz bis St. Goar (Rhein-km 493,0 – 557,5) durchgeführt. Der Analyse des heutigen Ausbauzustandes der Wasserstraßen mit Hilfe des 2D-hydro-/morphodynamischen Modellierungssystems TELEMAC-2D/Sisyphus folgt die Planung und Bewertung verschiedener Optionen eines Niedrigwasserausbaus. Klimabedingte Abflussänderungen fließen in Form von Bandbreiten projizierter Änderungen an den Haupt- und Nebenpegeln in die Untersuchungen ein. So wird für den Pegel Kaub eine Änderung der Niedrigwasserkenngroße NM7Q von +10 % bis -10 % in der nahen Zukunft (2021 - 2050) erwartet. Die Projektionen für die ferne Zukunft (2071 - 2100) zeigen Änderungen des NM7Q von -10 % bis -25 % (Nilson et al., 2010). Im Rahmen morphodynamischer Modellrechnungen wird der zukünftige Unterhaltungsaufwand in Form jährlicher Bagger- und Geschiebezugabemengen zum Erhalt des Status quo der Wasserstraße sowohl für ein Null-Szenario ohne Klimaänderungen als auch für klimabedingt veränderte Randbedingungen abgeschätzt. Auf Grundlage der Streckenanalyse werden die Abschnitte identifiziert, die bei den einzelnen Niedrigwasserszenarien zu Engpassstellen für die Schifffahrt werden.

Damit die Leistungsfähigkeit des Transportträgers Binnenschifffahrt auch bei extremen Niedrigwasserabflüssen erhalten bleibt, ist der Ausbau der Wasserstraßen in Form einer durchgehenden, gegebenenfalls breitenreduzierten Niedrigwasserfahrinne, welche vorhandene Übertiefen ausnutzt, erforderlich. Die Lage einer abgestuft vertieften Fahrinne wird im Rahmen des KLIWAS-Projekts 4.04 „Ermittlung von Fahrinnenmindestbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt“ ermittelt. Mit dieser bautechnischen Variante werden hydro- und morphodynamische Berechnungen durchgeführt, um die Unschädlichkeit der Baumaßnahmen hinsichtlich eines Wasserspiegelverfalls im Bereich von Niedrig- bis Mittelwasserabfluss nachzuweisen sowie Verlandungs- oder Erosionsprobleme zu erkennen. Des Weiteren sind die Stromabschnitte zu identifizieren, in welchen weitere Regelungsmaßnahmen erforderlich sind, um negative Auswirkungen der Niedrigwasserfahrinne zu vermeiden und deren Unterhaltungsaufwand zu minimieren. Mögliche Regelungsmaßnahmen sind neben den üblichen Buhnen und Parallelwerken temporär wirkende Buhnen und Schwellen. Für die morphodynamischen Langzeitsimulationen sind verschiedene Klimaszenarien beginnend mit dem Null-Szenario durchzuführen.

3 Ergebnisse

Die Modelluntersuchungen zeigen, dass mit sinkenden Niedrigwasserabflüssen in der fernen Zukunft (2071 bis 2100) ein nichtlinearer Anstieg der Gesamtvolumina der Fehlstellen innerhalb der Fahrinne einhergeht, also der Bereiche, in welchen die Fahrinnensolltiefe aufgrund zu geringer Wassertiefen unterschritten wird. Unter rein technischen Aspekten stellt eine auf reduzierter Breite vertiefte Fahrinne eine geeignete Maßnahme dar, um ausreichende Fahrwassertiefen zu erzielen. Eine Verbesserung in Bereichen ständig wiederkehrender Anlandungen kann durch Regelungsmaßnahmen erreicht werden, welche auf die Erhöhung der Schubspannungen und damit eine Verringerung der Anlandungsraten abzielen. Potenzial zur Erhöhung der Wasserspiegellagen bei Niedrigwasserabflüssen weisen flexible, nur bei diesen Abflüssen wirksam werdende Regelungselemente auf, welche jedoch noch erheblichen Untersuchungsbedarf aufweisen (Wurms & Schröder, 2011).

Aussagen zu zukünftigen Unterhaltungsstrategien machen eine möglichst genaue Abbildung von Anlandungs- und Erosionsbereichen im 2D-morphodynamischen Modell erforderlich. Die instationäre Kalibrierung und Validierung des morphodynamischen Modells zielt daher auf die Reproduktion der gemessenen Sohlevolutionen, der Transport-Abfluss-Beziehungen an den Geschiebemesstellen und insbesondere der ortsspezifischen Baggervolumina im Modellbereich ab. Anthropogene Eingriffe werden im Modell mit Hilfe des Bagger- und Verklappmoduls DredgeSim umgesetzt. Bild 1 zeigt für den Kalibrierzeitraum die Gegenüberstellung von realen und simulierten Baggermengen innerhalb des Geschiebefangs Mainz Weisenau sowie im Bereich der Fahrinne. Insgesamt ist das Modell nach der erfolgten Kalibrierung und Validierung in der Lage, den überwiegenden Teil der Unterhaltungsbaggerungen der Jahre 1997 bis 2009 in Lage und Volumen nachzubilden. Wesentlichen Einfluss auf die Morphodynamik hat neben der geeigneten Wahl sedimentologischer und transportspezifischer Parameter die Vorgabe der nicht erodierbaren Horizonte der Flusssohle, welche in vielen Bereichen des Rheingaus insbesondere im Nahbereich der Stromverzweigungen auftreten. Insbesondere im Bereich der Mariannenaue, deren Umgebungssohle mit nicht erodierbaren Strukturen durchsetzt ist, führen

diesbezügliche Datenlücken dazu, dass eine unterstrom gelegene Baggerstelle (ca. Rhein-km 518,0 – 519,5) im Modell bislang nicht adäquat abgebildet werden konnte.

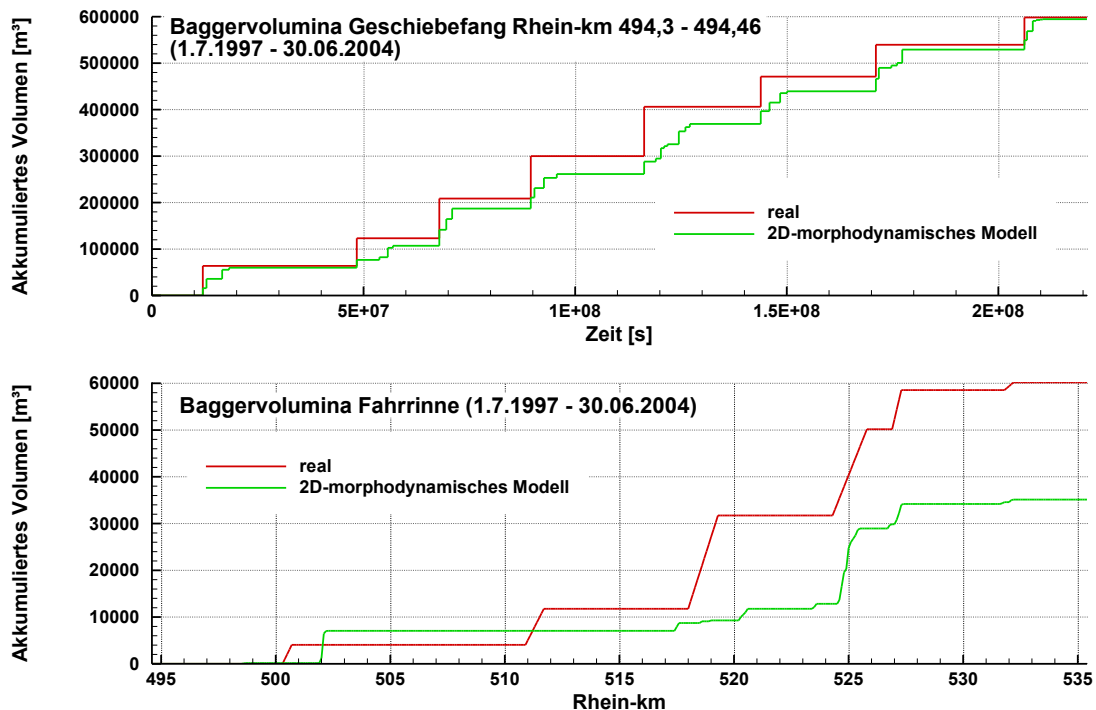


Bild 1: Akkumulierte Baggervolumina im Kalibrierzeitraum zwischen Mainz und Trechtingshausen (Rhein-km 493,0 – 535,36). Vergleich realer Daten mit vorläufigen Modellergebnissen.

Zur erforderlichen Beschleunigung der morphodynamischen Simulationen bei weitestgehender Beibehaltung der Ergebnissenauigkeit wurde die meist im Zusammenhang morphodynamischer Simulationen unter Verwendung stationärer oder periodischer hydrologischer Randbedingungen (z.B. Tiden) eingesetzte Technik des *morphologischen Faktors* auf die Erfordernisse des instationär betriebenen Modells angepasst. Die Geschiebetransportraten im Modell werden dabei mit einem Faktor skaliert, zur Wahrung der Massenbilanz wird die Zeitachse der hydrologischen Ganglinie um denselben Faktor gestaucht. Über die Anpassung der Ausführungszeiten und -dauern der Unterhaltungsmaßnahmen an die gestauchte Zeitskala lassen sich bei gleichzeitiger Skalierung der Bagger- und Verklappraten anthropogene Eingriffe ebenfalls im Modell abbilden. Es zeigt sich, dass morphologische Faktoren bis 10 ohne wesentliche Einbußen der Ergebnissenauigkeit möglich sind. Die Simulationszeit des beschleunigten Modells bezogen auf das Referenzmodell verhält sich dabei nahezu linear-reziprok zum morphologischen Faktor.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- Schwachstellenanalyse und Entwicklung wasserbaulicher Anpassungsmaßnahmen,
- Abschätzung des klimabedingt veränderten Unterhaltungsaufwands,
- morphodynamische Bewertung der einzelnen Ausbauvarianten sowie Optimierung von Unterhaltungsstrategien für unterschiedliche Abflussszenarien und
- qualitative Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Abschnitte der Wasserstraße.

Laufzeit des Vorhabens von 2009 bis 2013.

5 Literatur

Nilson, E., Carambia, M., Krahe, P. (2010): Low Flow Changes in the Rhine River Basin. In: Görgen, K. et al.: Assessment of climate change impacts on discharge in the Rhine River Basin: Results of the RheinBlick2050 Project. CHR Report No. I-23, pp. 115-119.

6 Veröffentlichungen

Wurms, S., Schröder, M. (2011): Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen. In: BMVBS (2011): KLIWAS – Auswirkungen des Klimawandels auf Wasserstraßen und Schifffahrt in Deutschland, Tagungsband zur 2. Statuskonferenz, 25. – 26. Oktober 2011, Berlin.

Hydraulische Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen

Netzplan-Nr.: A39530170002

Projektleiter: Dr. sc. techn. 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

Bei zahlreichen Wehr- und Stauanlagen, welche zur Gewährleistung der Schifffahrt und/oder zur Nutzung der Wasserkraft errichtet wurden, besteht die Notwendigkeit zur Ergänzung von funktionsfähigen technischen Fischaufstiegsanlagen um die ökologische Durchgängigkeit wieder herzustellen. Dabei ist die Bedingung für die Funktionsfähigkeit einer Fischaufstiegsanlage, dass sie für die große Mehrzahl der für die betrachtete Fließgewässerregion relevanten Fischarten durchgängig ist. Zur Bemessung von Fischaufstiegsanlagen wird auf Erfahrungswerte zurückgegriffen, die in technische Bemessungsregeln einfließen. Die Bemessung hat das Ziel, eine Strömungssituation zu erzeugen, die den Fischen ermöglicht, ein vorhandenes Querbauwerk zu überwinden.

Bei Planung und Bau von technischen Fischaufstiegsanlagen existieren bereits umfangreiche Erfahrungen vor allem für kleine und mittlere Fließgewässer, welche in entsprechenden Regelwerken zusammengefasst sind. Solche Regelwerke beziehen sich auf Erfahrungswerte aus den verschiedenen Studien der letzten Jahrzehnte und beinhalten eine Sammlung geometrischer Parameterintervalle aus den positiv bewerteten Varianten dieser Studien. Eine systematische Untersuchung des Zusammenspiels dieser Parameter und deren Auswirkungen auf die Strömung steht jedoch aus. Darüber hinaus existieren auch bei der Übertragung des Stands der Technik auf die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen Unsicherheiten.

1.2 Bedeutung für die WSV

Das seit dem 1. März 2010 geltende Gesetz zur Neuregelung des Wasserrechts (WHG) verpflichtet die WSV zur Erhaltung oder Wiederherstellung der ökologischen Durchgängigkeit an den Staustufen, die von ihr errichtet oder betrieben werden, soweit dies für die Erreichung der Ziele der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie erforderlich ist. Da die überwiegende Anzahl der WSV-Staustufen über keine ausreichend funktionsfähigen Anlagen verfügen, die die Fischwanderung und damit die Durchwanderbarkeit der Bundeswasserstraßen gewährleisten, wird an einer Vielzahl der Staustufen der Bau von Fischwechsellanlagen bzw. deren Ertüchtigung erforderlich. Es besteht demnach in der WSV ein großer Bedarf, die vorhandenen Erfahrungen bei Fischaufstiegsanlagen für die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen zu prüfen und weiterzuentwickeln.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel des FuE-Projektes ist allgemeingültige, objektunabhängige Gesetzmäßigkeiten als quantitative Handreichung zur Dimensionierung von Fischaufstiegsanlagen an Bundeswasserstraßen zu erarbeiten. Das vorliegende FuE-Projekt beschäftigt sich mit dem Themenfeld der Passierbarkeit, d.h. mit den Verhältnissen innerhalb der eigentlichen Fischaufstiegsanlage. In dem hier beschriebenen FuE-Projekt liegt der Fokus auf dem sogenannten Schlitzpass, da dieser der am häufigsten eingesetzte Bautyp ist.

Im Rahmen des FuE-Projektes sollen die zugelassenen geometrischen Parameterintervalle vom Merkblatt DWA-M 509 systematisch untersucht werden, um derer Auswirkungen auf die Strömungseigenschaften in Schlitzpässen aufzuzeigen, insbesondere die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsverteilung und Turbulenz innerhalb der Becken.

Die Untersuchungsergebnisse müssen später in fischbiologischer Hinsicht bewertet werden, um belastbare Bemessungsvorgaben abzuleiten. Dies ist derzeit wegen fehlender Ergebnisse aus Schwimmverhaltensuntersuchungen von Fischen sehr begrenzt möglich, da der Einfluss unterschiedlicher

Strömungseigenschaften auf das Schwimmverhalten verschiedener Fischarten derzeit nur begrenzt zur Verfügung steht.

2 Untersuchungsmethoden

Die Auswirkungen der Geometrie auf die Strömungseigenschaften werden mittels physikalischer Modelluntersuchungen ermittelt, in dem die relevanten Geometrievarianten eingebaut und untersucht werden. Da sowohl die entstehende Anzahl der Varianten als auch der zeitliche Aufwand der Messung einzelner Varianten groß sind, werden unterschiedliche Aspekte in unterschiedlichen physikalischen Modellen, mittels unterschiedlichen Messverfahren in Kooperation mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung des KIT (IWG) in zwei Teilprojekten parallel untersucht. Die Auswirkungen auf die Turbulenz werden im Teilprojekt 1 in Laborräumen der BAW durchgeführt, die Auswirkungen auf die Geschwindigkeitsverteilung sollen im Teilprojekt 2 in Laborräumen des IWG durchgeführt werden.

2.1 Teilprojekt 1: Untersuchungen zu Turbulenz

Die Auswirkungen der Beckengeometrie auf die Turbulenz (z.B. vorkommende Skalen und Energieinhalt) werden in einem physikalischen Modell mit neun aufeinander folgenden Fischpass-Becken ermittelt. Die Sohlneigung des Modells ist auf 2,8% fixiert, die Beckendimensionen sind 78,5 x 99,0 cm. Die Schlitzpasseinbauten sind flexibel anpassbar. Das Modell entspricht einem Maßstab von ca. 1:4 in Bezug auf die Verhältnisse der geplanten Fischaufstiegsanlagen am Neckar. Die Messungen werden mittels hochauflösender Messverfahren (PIV und ADV) durchgeführt,

2.2 Teilprojekt 2: Untersuchung der Geschwindigkeitsverteilung

Die Untersuchungen zur Geschwindigkeitsverteilung werden an einem physikalischen Modell eines Schlitzpasses mit 6 aufeinander folgenden Becken am IWG durchgeführt. Die Schlitzpasseinbauten sind als modulare Elemente installiert, um eine große Variabilität im Bezug auf die geometrischen Abmessungen der Becken und Schlitze zu ermöglichen. Die Sohlneigung des Modells ist variabel einstellbar.

Im Rahmen der Voruntersuchung wird die Strömungssignatur in den Becken mittels Langzeitbelichtung aufgenommen. Die Messung der Geschwindigkeiten wird mit einem ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Teilprojekt 1

Die Vorgaben des Laserschutzkonzeptes zur Gewährleistung der Lasersicherheit an dem Versuchstand wurden umgesetzt. Anschließend wurde der PIV-Messplatz durch den TÜV SÜD aus arbeitssicherheitstechnischer Hinsicht in Anlehnung an die Maschinenrichtlinie und Niederspannungsrichtlinie geprüft und mit einer CE Konformitätsbescheinigung bestätigt. Der Messplatz konnte in Betrieb genommen werden.

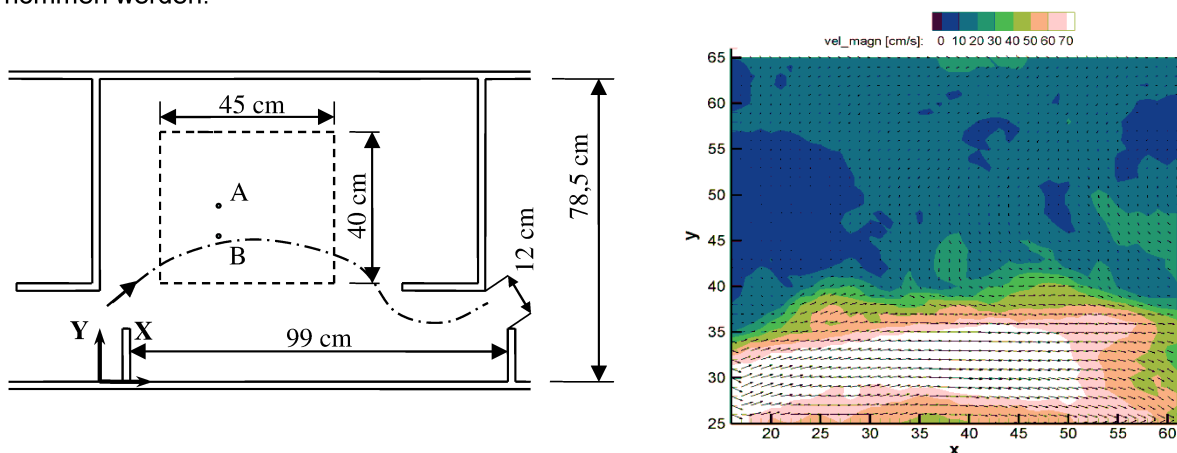


Bild 1: (a) Position des PIV-Messfeldes während der Testmessungen, (b) gemessene Geschwindigkeitsverteilung innerhalb des Messfeldes

Anhand erster Testmessungen konnte bestätigt werden, dass mit der gewählten zeitlichen und räumlichen Auflösung des PIV-Systems (200 Hz und 45 x 40 cm Messfeld) die Fließgeschwindigkeitsmessungen in dem Fischpass möglich sind. Abbildung 1 (a) zeigt die Position des Messfeldes innerhalb des sechsten Beckens Abbildung 1 (b) zeigt die gemessene Verteilung der Fließgeschwindigkeiten innerhalb des Messfeldes. Die Testmessungen haben jedoch auch gezeigt, dass an einzelnen Bauteilen des Versuchsstands Optimierungsbedarf besteht, welcher nun sukzessive umgesetzt wird.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

4.1 Teilprojekt 1

- 2013: – Optimierung der Auswertung der PIV-Daten
 - Hydraulische Untersuchungen der Varianten in der PIV-Rinne
- 2014: – Ergebnissynthese und Ableitung eines hydraulischen Bemessungsverfahrens
 - Dokumentation

4.2 Teilprojekt 2

- 2013: Erarbeitung eines Messkonzepts
 - Umbau der vorhandenen Rinne am IWG
 - Voruntersuchung verschiedener Varianten mittels Langzeitbelichtung und ADV
- 2014: – Hydraulische Untersuchungen verschiedener Varianten mittels ADV
- 2015: – Ergebnissynthese und Ableitung eines hydraulischen Bemessungsverfahrens
 - Dokumentation

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2015.

Berücksichtigung dreidimensionaler Strömungseffekte und Transportphänomene in morphodynamischen Modellen von Binnenwasserstraßen

Netzplan-Nr.: A39530170003

Projektleiter: Dr.-Ing. T. Wenka, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,
Referat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

E-Mail: thomas.wenka@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Morphologische Betrachtungen sind aufgrund der ausgedehnten Beobachtungszeiträume überwiegend großräumig und langfristig angelegt. Die Analyse der sohlnahen 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 Geschiebebewirtschaftungsmaßnahmen 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-Sisypho-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

Basierend auf den Erkenntnissen aus den vorhergehenden Untersuchungen zum Einfluss der Dimensionalität der Strömungsmodellierung auf die Geschiebetransportvorgänge (vgl. IWG 2011b) wurde in das Morphologiemodul „SISYPHE“ für die 2D-tiefengemittelte Modellierung ein Ansatz zur Verbesserung der Erfassung des Sekundärströmungseinflusses auf die Geschiebetransportrichtung implementiert. Mit Hilfe der Berücksichtigung einer Anpassungslänge („Loading-Law“-Ansatz) wird hierbei versucht die Geschiebetransportrichtung im An- und Nachlaufbereich von Gerinnekrümmungen zu korrigieren. Der Ansatz wird derzeit anhand von Untersuchungen in Modellgerinnen sowie Naturstrecken validiert.

Mittels ergänzender und vergleichender 3D-Untersuchungen zu den 2D-tiefengemittelten Simulationen im Mäanderabschnitt des Modellgebiets „Mittlerer Niederrhein“ konnte der bislang anhand von Laborgerinnebetrachtungen festgestellte Einfluss der Dimensionalität der Strömungsmodellierung auch unter natürlichen Randbedingungen bestätigt werden. Trotz der nahezu identischen Wasserstände sowie der guten Übereinstimmung hinsichtlich der sich in Gerinnekrümmungen einstellenden Wasserspiegelquerneigungen führt die dreidimensionale Modellierung dabei zu lokal signifikanten Differenzen in der Sohlhöhenentwicklung.

Aufgrund der in Telemac-3D vereinfachenden Annahmen bei der Lösung der dreidimensionalen Strömungsgleichungen, die überwiegend auf der Vorgabe einer hydrostatischen Druckverteilung beruhen, wurden mittels eines sogenannten „Voll-3D-Verfahrens“ hydraulische Vergleichsrechnungen in unterschiedlichen Modellgerinnen (gerade BAW-Rinne, Wormleaton (2005), YEN-Krümmen (Yen et al. (1995)) durchgeführt. Hierbei kam das Verfahren „SSIIM“ der Universität Trondheim zum Einsatz. Die

Strömungssimulationen zeigten generell eine gute Übereinstimmung zwischen beiden Verfahren. Trotz der in Telemac-3D vorhandenen Vereinfachungen wurden die in Gerinnekrümmungen auftretenden Sekundärströmungen bei beiden Modellverfahren sowohl hinsichtlich ihres Verlaufs als auch ihrer Intensität in gleicher Größenordnung erfasst.

In einem weiteren Arbeitsschritt wurde in das Morphologiemodul „SISYPHE“ ein neuer Geschiebetransportansatz für den fraktionierten Transport unter Berücksichtigung der Hiding- und Exposure-Effekte nach Wu et al. (2000) implementiert, dem in der aktuellen Literatur das breiteste Anwendungsspektrum attestiert wird. Erste Anwendungen bei der mehrdimensionalen Modellbetrachtung von Laborgerinnen lieferten plausible Ergebnisse, so dass nun der Ansatz nach Wu et al. (2000) unter realen Randbedingungen anhand des Modells „Mittlerer Niederrhein“ getestet werden soll.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

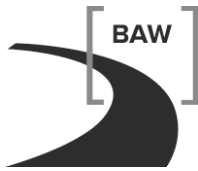
2013 – 2014:

1. Erfassung des Sekundärströmungseinflusses und der Sohlschubspannung in 2D- und 3D-FT-Modellen (s. Kooperationsvereinbarung zwischen IWG und BAW)
 - Mehrdimensionale Simulationen und vergleichende Betrachtungen am Modell „Mittlerer Niederrhein“ (Simulation einer Jahresganglinie, Analyse der zeitlichen Entwicklung, Validierung der Ergebnisse anhand Flächenpeilungsdaten)
 - Untersuchungen der sog. „TKE-Methode“, einem alternativen Ansatz zur Berücksichtigung der Sohlschubspannungen.
 - Mehrdimensionale Betrachtung eines Modellgerinnes mit milden Krümmungen.
2. Alternative Geschiebetransportansätze zur numerischen Modellierung des Bewegungsbeginns und des Sedimenttransports
 - Weitere Analyse und Umsetzung der Literaturstudie „Alternative Ansätze zur Berechnung des Geschiebetransports in Fließgewässern“ der TU München.
 - Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen nicht-deterministischer Geschiebetransportansätze in mehrdimensionalen Feststofftransportmodellen.

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2014.

5 Literatur

- BAW (2007): Abschlussbericht zum FuE-Projekt 8140, Stabilität der Sohle von Wasserstraßen
- BAW (2010): Fachkonzept der Projektgruppe Mehrdimensionale Feststofftransportmodellierung, Vers. 1.0
- 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-Sisyphe Programmumgebung. Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, März 2011.
- IWG (2011b): 2. Zwischenbericht zur Weiterentwicklung der Telemac-Sisyphe Programmumgebung. 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. *ASCE, Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 131, No. 8, pp. 665 – 681.
- Wu, W.; Wang, S; Jia, Y. (2000): Non-uniform sediment transport in alluvial rivers. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 38, No. 6



Yen, C.L.; Lee, K.T. (1995): Bed Topography and Sediment Sorting in Channel Bend with Unsteady Flow, ASCE, Journal of Hydraulic Engineering, Vol.121, No.8

6 Veröffentlichungen

Riesterer, J.; Brudy-Zippelius, T.; Wenka, T.; Nestmann F. (2013): Multidimensional Bed Load Transport Modelling of a Secondary Flow influenced Curved Channel. Zur voraussichtlichen Veröffentlichung im ASCE, Journal of Hydraulic Engineering eingereicht im Juli 2012.

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 Anforderung 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. Die Kenntnis der Beeinflussung der Morphologie der Flusssohle (z.B. Dünen) durch Veränderungen der Stromregelungsbauwerke ist darüber hinaus für die Ermittlung der hydraulischen Rauheitsbeiwerte der Flusssohle für numerische Modellierungen von hohem Interesse.

1.2 Bedeutung für die WSV

Eine genaue und detaillierte Kenntnis des Geschiebetransportes und der Bewegungsmuster von Sohlformen und deren Auswirkungen auf die Hydraulik 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 2012 wurden Untersuchungen zur Auswirkung von im Rahmen der Unterhaltung modifizierten Strombauwerken auf den Geschiebetransport in der Strommitte durchgeführt. In Zusammenarbeit mit den Hochschulen in Karlsruhe und Braunschweig wurden dazu die

Auswirkungen von systematisch angeordneten Bühnenkerben und einer Deckwerksstrecke auf die Strömung und den Geschiebetransport im Flussbett vermessen und analysiert.

Die Auswertungen und Analysen der Naturuntersuchungen an der Elbe an alternativen Bühnenformen (Knickbühnen und Bühnenkerben sowie Referenzbühnenfelder) wurden im Jahr 2012 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. Die Ergebnisse dieses Projektes sollen in einer interdisziplinären Publikation zusammengefasst werden.

2 Untersuchungsmethoden

An der BAW stand im Jahr 2012 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.

3 Ergebnisse

Die neue flussbauliche Systemrinne wurde hydraulisch und morphologisch geeicht. Im Jahr 2012 wurden Untersuchungen zur Wirkung von Bühnenkerben und von Deckwerken 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 und 2012 zusammengefasst und werden in einer gemeinsamen Schrift im Jahr 2013 veröffentlicht. Die Naturuntersuchungen zu den hier betrachteten alternativen Strombauwerken (Knick- und Kerbbühnen sowie Referenzbühnen) wurden auch im Jahr 2012 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.

Im Jahr 2012 wurden Untersuchungen zur Auswirkung von Bühnenkerben auf die Strömung in den Bühnenfeldern (s. Bild 1) und auf die Sohlstruktur im Fluss bei nicht überströmten Bauwerken fortgeführt (Haber 2012). Weitere Analysen an den hier gewonnenen Datensätzen werden in Zusammenarbeit mit dem Leichtweiss-Institut der Universität Braunschweig (LWI 2012) und der Hochschule Magdeburg-Stendal durchgeführt. Beispielsweise werden an der Hochschule in Magdeburg in einer Kooperation mit der BAW an einer Laborrinne die Auswirkungen unterschiedlicher sedimentologischer Kennwerte bei unterschiedlichem Modellgeschiebe auf die Dünenbildung und Dünenbewegung untersucht (Ettmer 2012).

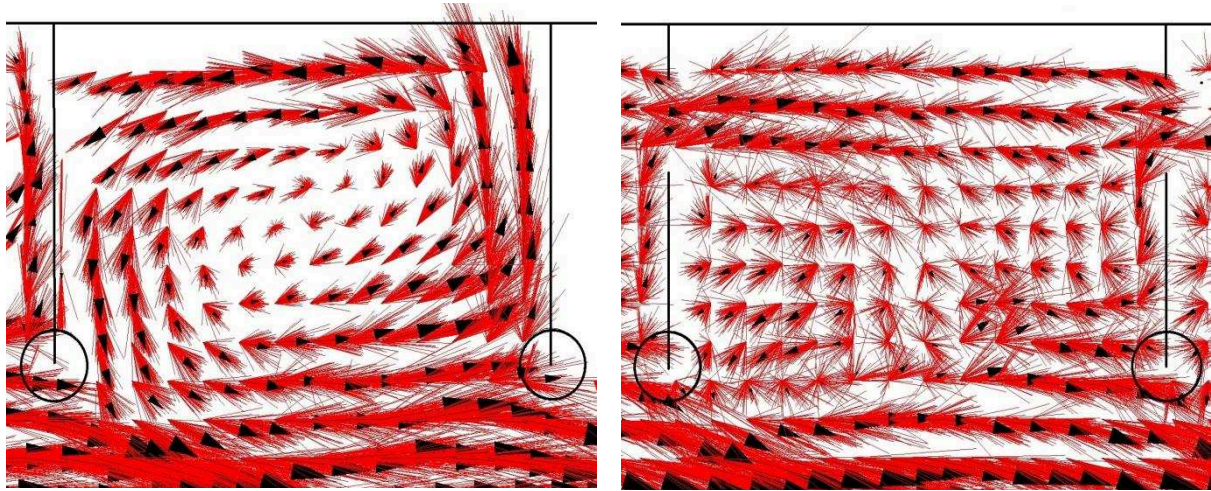


Bild 1: Resultierende Vektoren und Einzelvektoren der Fließgeschwindigkeit an der Wasseroberfläche (3D-PTV) bei geschlossenen (links) und geöffneten (rechts) Bühnenkerben

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: 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“ sowie Deckwerke 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.

In Zusammenarbeit mit der Gesamthochschule Kassel und der Technischen Universität Karlsruhe werden Untersuchungen an Dünen in der Laborrinne fortgeführt. Um die Hydraulik über Dünen im Detail und hochgenau quantifizieren zu können, wurde dazu mit einem neuartigen Verfahren eine sich durch eine Strömung ausgebildete Dünentopografie chemisch fixiert.

Die Kooperation mit der Hochschule Magdeburg-Stendal zu künstlichen Sohlmaterialien für experimentelle Untersuchungen werden fortgesetzt.

Für das Jahr 2013 ist die Fertigstellung der interdisziplinären Publikation mit der BfG und Dritten zu alternativen Strombauwerken geplant.

Laufzeit des Vorhabens von 1999 bis 2013.

5 Literatur

Ettmer, Bernd (2012): Nachbildung von Sieblinien aus künstlichen Sohlenmaterialien in experimentellen Untersuchungen, Hochschule Magdeburg-Stendal, Fachbereich Wasser- und Kreislaufwirtschaft, Magdeburg 2012, Bericht im Auftrag der BAW

Haber, Bernadette (2012): Physikalische Modellversuche zu Austauschprozessen zwischen Hauptströmung und der Bühnenfeldströmung von Kerbbühnen, Diplomarbeit KIT-Karlsruhe, Angefertigt an der BAW, 2012

6 Veröffentlichungen

Henning, M. Hentschel, B. (2011). Sedimentation and Flow Patterns Induced by Regular and Modified Groynes on Elbe River, Germany, (29 pages), Ecohydrology Volume 5, Wiley Online Library, United Kingdom

- Hentschel, B.; M. Henning; Th. Hüsener (2012): Modifikation an Bühnenfeldern; Wasserbau Symposium 2012 „Wasser – Energie, Global denken – lokal handeln“, Graz, Österreich, 12.- 15. September 2012, Abdruck im Tagungsband
- Hüsener, Thorsten, Faulhaber, Petra, Baron, Manuela (2012): Modifikationen in bestehenden Stromregelungssystemen an Wasserstraßen Untersuchung mit gegenständlichen und numerischen Verfahren, Wasserbau Symposium 2012 „Wasser – Energie, Global denken – lokal handeln“, Graz, Österreich, 12.- 15. September 2012, Abdruck im Tagungsband
- LWI (2012); Durchführung der dauerhaften Befestigung der Sanddünensohle in einer Versuchsrinne, Leichtweißinstitut der Universität Braunschweig (LWI), Bericht 2025, 2012, im Auftrag der BAW. 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 Hardwarebeschleunigten Ausführung von Codes begleitet. Die dynamischen Entwicklungen im Bereich *General Purpose Computing on Graphics Processing Units* (GPGPU) werden seit 2007 durch die Bereitstellung von Entwicklungswerkzeugen ermöglicht, die eine direkte Verwendung einer GPU für arithmetisch intensive, hoch parallelisierte Operationen erlauben. Während die Nutzung der heterogenen Parallelität für die allgemeine Benutzersoftware die Bewältigung eines schwierigen Paradigmenwechsels sein kann, sind viele Codes aus dem Bereich der physikalischen Simulation bereits vor Jahrzehnten so strukturiert worden, dass die vorhandene feinkörnige Parallelität mit Vektorprozessoren stark beschleunigend wirkte und eine grobkörnige Parallelisierung (über mehrere Rechneinheiten) 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 gewährleisteten 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 [Hoferock J, Bell N. 2010, 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).

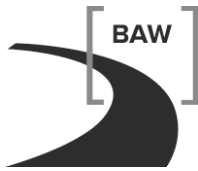
- Das Verfahren erlaubt bei dem gegebenen PC-System und 1,5 GB Speicher der Grafikkarte Modellgrößen von 4,5 bzw. 9,5 Millionen Zellen bei doppelter bzw. einfacher Genauigkeit von Gleitkommazahlen. Bei vier unterschiedlichen Testfällen (ohne Ausgabe der Ergebnisse) wurden Beschleunigungen in der Größenordnung 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.
- Vortrag bei National Institute of Water and Atmospheric Research (NIWA), Wellington, Neuseeland.
- Restrukturierung und Modularisierung des Codes unter Verwendung von C++-Strukturen.
- 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 einem existierenden BAW-Modell.
- GPU-Implementierung von Lagrange-Advektionsschema und konservativem Upwind-Advektionsverfahren nach [Stelling GS, Duinmeijer SPA., 2003] jedoch ohne Untersuchung derer Eigenschaften.
- Kurzpräsentation des Projekts auf dem 9. UnTRIM-Workshop in Trient (7.-9. Mai 2012).
- Veröffentlichung und Präsentation auf der HIC2012-Konferenz in Hamburg (14-18. Juli 2012).
- Interner Vortrag und Diskussion der weiteren Vorgehensweise im Projekt am 25. Juli 2012.

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 und anschließende Arbeiten an dem neuen Code. Nach dem internen Vortrag mit anschließender Diskussion am 25. Juli 2012 werden die ursprünglich geplanten weiteren Arbeiten zunächst ausgesetzt. Die Gründe dafür liegen in der zeitlich noch nicht verfügbaren GPU-Cluster-Hardware und vor allem in der erforderlichen Diskussion über die weitere Vorgehensweise bei der Bearbeitung der notwendigen Softwareentwicklungen. Für 2013 wird deswegen die Erstellung eines kurzen Schlussberichts und eines Antrags auf ein fortführendes FuE-Projekt geplant.

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>.
- Hoferock 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.

6 Veröffentlichungen

Jankowski, JA (2012) A hardware-accelerated parallel implementation of a two-dimensional scheme for free surface flows. *Proceedings of 10th Int. Conf. on Hydroinformatics (Hic2012)*, Hamburg, Germany.

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 Sohl-schubspannungsverteilungen auf Subgrid-Niveau im Hinblick auf die Anwendbarkeit der Entwicklung in der Modellierung morphologischer Prozesse.

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

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 wurde nach dem Aufbau eines hydronumerischen Modells (2D, auf strukturierten Netzen) unter Verwendung der Subgrid-Technologie ein Algorithmus zur Erkennung von Hindernissen und zur Zellteilung an diesen entwickelt und getestet. Weiterhin wurden in Zusammenarbeit mit N. Volp (TU Delft, Morphodynamic modelling of tidal estuaries) verschiedene Algorithmen zur Rekonstruktion der Geschwindigkeit entwickelt und getestet. Ein weiterer Entwicklungsbaustein war die verbesserte Berechnung der Bodenschubspannung in einem z-Schichten-Modell mit Weiterentwicklung für Subgrid-Technologie. Ferner wurde der Frage nachgegangen, inwieweit Multigrid-Gleichungslösungsverfahren die numerische Strömungsberechnung beschleunigen können. Dazu gehörten der Aufbau und Testen eines Multigrid-Gleichungslösers für das o.g. hydronumerische Modell sowie des Multigrid-Ansatzes als beschleunigenden Prekonditionierer für den im hydronumerischen Modell verwendeten Gleichungslöser (CGM). Am 20.9.2011 in Delft ein Statustreffen durchgeführt.

Im Jahr 2011 wurde an folgenden Veranstaltungen 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

Im Jahr 2012 wurden die folgenden Themen bearbeitet:

- Weiterentwicklung zur verbesserten Berechnung der Bodenschubspannung in einem z-Schichten-Modell; Das Verfahren wurde sowohl in Delft3D als auch in das Verfahren UnTRIM implementiert und verifiziert. In Delft3D konnte durch das Verfahren eine verbesserte Berechnung der Schubspannung an den Schichtgrenzen erreicht. Die Arbeiten an UnTRIM erzielten ein differenziertes Ergebnis und wurden intern dokumentiert. Als Ergebnis dieses Themenkomplexes konnte ein Konferenz-Beitrag (HIC 2012, Hamburg) fertig gestellt werden.
- Kombination des neu entwickelten Verfahrens zur Berechnung der Bodenschubspannung mit einem k- ϵ -Modell (Rodi, 1980); Das Verfahren wurde durch Messdaten, welche in Versuchen an einer an der BAW betriebenen hydraulischen Rinne generiert wurden, mit Erfolg verifiziert. Ein wissenschaftlicher Beitrag zur Veröffentlichung dieser Arbeiten in einer Fachzeitschrift wurde verfasst. Der Beitrag soll Anfang 2013 zur Veröffentlichung eingereicht werden.
- Verknüpfen des Multigridansatzes mit dem Subgridansatz; Untersuchung anhand von fünf Beispielanwendungen (drei artifiziellen Testbeispielen und zwei Flussanwendungen), inwieweit eine Beschleunigung der Berechnung stationärer Zustände durch den Einsatz der beiden Ansätze erreicht werden kann. Die Ansätze wurden separat und kombiniert getestet. Ein stationäres Beispiel für einen Abschnitt an der Waal (Niederlande) hat gezeigt, daß, mit dem kombinierten Multigrid-Subgrid Ansatz eine bis 50-fache Beschleunigung möglich ist.
- Erste Untersuchungen verschiedener Ansätze zur Berechnung der Advektion mit den Verfahren UnTRIM, Telemac und D-FLOW FM anhand einer flusshydraulischen Anwendung aus dem Aufgabenbereich der BAW, mit dem Ziel einer Einschätzung des Einflusses der gewählten Advektionsansätze auf Modellergebnisse sowie der Formulierung einer Handlungsempfehlung für bestimmte Modellierungsaufgaben.
- Erste Untersuchungen verschiedener Turbulenzmodelle in Kombination mit verschiedenen numerischen Verfahren (UnTRIM, Telemac und D-FLOW FM), mit dem Ziel einer Einschätzung des Einflusses des gewählten Turbulenzmodells auf Modellergebnisse sowie der Formulierung einer Handlungsempfehlung für bestimmte Modellierungsaufgaben.

An folgenden Veranstaltungen wurde im Jahr 2012 teilgenommen:

- Teilnahme am Kurs: Iterative Gleichungssystemlöser und Parallelisierung, Höchstleistungsrechenzentrum der Universität Stuttgart, 12.-16. März 2012
- Teilnahme 9. UnTRIM User Workshop, Trento, Italien, 7.-9.5.2012
- Teilnahme Hydro Informatics Conference, Hamburg, 14.-18.7.2012
- Teilnahme an den Delft Software Days, Delft, 28.-29.11.2012

Darüber hinaus wurden am 9.1.2012 in Karlsruhe und am 12.9.2012 in Delft Statustreffen durchgeführt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

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.

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2014.

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/flid.2361, *International Journal for Numerical Methods in Fluids*.

6 Veröffentlichungen

F. Platzek, G.S. Stelling, J.A. Jankowski, R. Patzwahl (2012) On the representation of bottom shear stress in z-layer models. *Proceedings of HIC 2012 - 10th International Conference on Hydroinformatics*, Hamburg, Germany, July 14-18, 2012.

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 die Erstellung von Bemessungsbeispielen (F8).

2 Untersuchungsmethoden

Die Methoden orientieren sich an Fragestellung und 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 (F4), Untersuchungen an Normprobekörpern (F5, F6) sowie dynamische Prüfungen und Beschusstests (F6).

3 Ergebnisse

Seit September 2009 wurden am Institut für Mechanik, Karlsruher Institut für Technologie, im Rahmen des Forschungsschwerpunktes F4 verschiedene Fragestellungen mit Hilfe von nichtlinearen quasi-statischen Finite-Elemente-Fluid-Struktur-Simulationen untersucht, bei denen das dynamische Verhalten vernachlässigt wird. Die Untersuchungen sind abgeschlossen, der Bericht liegt seit März 2012 vor (Maurer & Schweizerhof, 2012).



Bild 1: Verteilung der ersten 1.Hauptspannung in der Membran bei unterschiedlicher Wangen-
neigung: 45° (links) und 75°(rechts)

Es zeigte sich u.a., dass insbesondere für die maximalen Spannungen der Faltenbereich besonders betrachtet werden muss, da dort bei Schlauchwehren das Mehrfache der Spannungen wie in Feldmitte auftreten (Bild 1). Ein Vergleich der Simulationsergebnisse für unterschiedliche Geometrien zeigt,

dass die Spannungen im Bereich der Wehrwangen sehr stark streuen und stark von der gewählten Geometrie, dem Innendruck und dem Oberwasserstand beeinflusst werden. Interessant dabei ist, dass für große Innendrucke und folglich große Spannungen in Feldmitte der Unterschied zwischen den Spannungen im Randbereich und Feldmitte abnimmt und daraus ein $SCF = 1,0$ resultiert (Bild 2). Weitere Simulationsergebnisse sind Gebhardt et al. (2012) und Maisner et al. (2012) zu entnehmen.

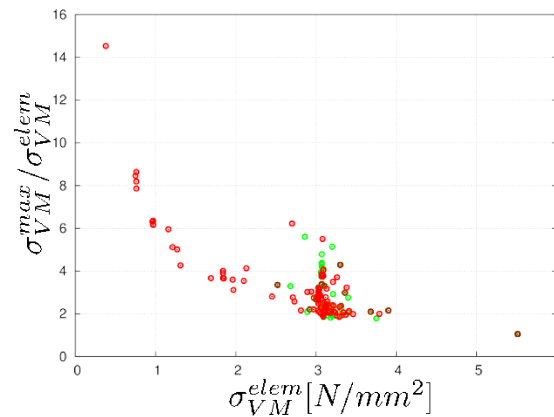


Bild 2: *SCF der Von-Mises Spannungen beim wassergefüllten Schlauchwehr ohne äußere Belastung*

Bisher gibt es keine standardisierte Bemessung der Schlauchmembranen. Bei kleineren Anlagen erfolgen die Nachweise durch die Hersteller in vielen Fällen mit Hilfe vereinfachter Berechnungsansätze oder durch Typenstatiken. Für größere Anlagen ist das aber nicht ausreichend. Van der Horst & Rövekamp (1999) berichten über die Bemessung des Sturmflutwehres Ramspol in den Niederlanden, das auf dem semi-probabilistischen Teilsicherheitskonzept beruht, wie es der neuen Normengeneration zugrunde liegt. Dabei wurde für die Bemessung die größtmögliche Belastung F_{stat} bestimmt, die in Ramspol in etwa alle 1000 Jahre auftritt.

$$\gamma_{dyn} \cdot SCF \cdot F_{stat} = \gamma_{test} \cdot SCF_{test} \cdot R_{test} / \gamma_m \quad \text{Gl. (1)}$$

In Gleichung (1) entspricht F_{stat} auf der Einwirkungsseite der Membranspannung in Feldmitte, die analytisch nach der Membrantheorie berechnet werden kann. Die Spannungskonzentration $SCF = 4,2$ nahe der Wehrwange wurde über FE-Analysen und die dynamische Belastung γ_{dyn} infolge Wellen über physikalische Modelluntersuchungen bestimmt. Auf der Widerstandsseite steht die Bruchfestigkeit R_{test} der Membran, der Abminderungsbeiwert γ_{test} für die Streuung der Testergebnisse und SCF_{test} für die Spannungskonzentrationen an der Materialprobe. Aufgrund der Unsicherheit, ob bei der Betrachtung auch alle möglichen Geometrien berücksichtigt wurden, die das Schlauchwehr annehmen kann, wurde ein zusätzlicher Sicherheitsfaktor von $\gamma_m = 1,2$ angesetzt.

Der Abminderungsbeiwert γ_{test} wird üblicherweise über ein Quantil aus der Verteilungsfunktion des Materialkennwertes bestimmt. In Bild 3 sind beispielhaft für eine 2-lagige, 12 mm dicke Schlauchmembran die empirischen Verteilungsfunktionen der Bruchfestigkeiten in Längs- und Querrichtung (Umfangsrichtung) dargestellt. Zum Vergleich: Der Mittelwert für die Bruchfestigkeit in Längsrichtung beträgt 240,4 N/mm und in Querrichtung 321,4 N/mm. Legt man ein 5 %-Quantil zugrunde, so ergibt sich in diesem Beispiel in Längsrichtung eine Bruchfestigkeit von etwa 160 N/mm, die in 95 % der Fälle nicht unterschritten wird, und in Querrichtung eine Bruchfestigkeit von etwa 220 N/mm.

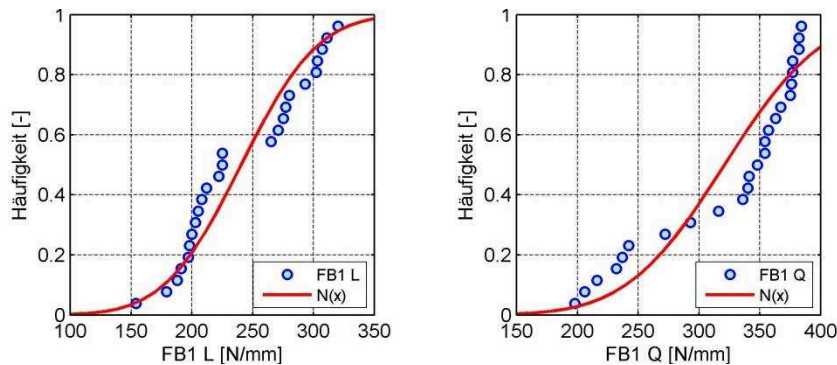


Bild 3: Empirische Verteilungsfunktion der Bruchfestigkeit in Längs- (a) und Querrichtung (b); Zugprüfungen am Bergbaustab nach DIN EN ISO 283-1

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Ursprünglich war geplant, die Ergebnisse in Form eines Merkblattes bis zum 31.12.2012 zusammenzufassen. Aufgrund anderer Prioritäten konnte in 2012 aber nicht daran gearbeitet werden, so dass eine Verlängerung des FuE-Vorhabens bis zum 31.12.2013 erforderlich ist.

Im ersten Quartal 2013 werden im Rahmen einer Diplomarbeit an der BAW weitere FEM-Analysen zur Spannungskonzentration und Faltenbildung bei Schlauchwehren durchgeführt. Ziel ist es, die von Maurer & Schweizerhof (2012) erzielten multiplen nichtlinearen Regressionskurven zu vereinfachen und um die bisher nicht variierte Biegesteifigkeit der Membran zu erweitern. Zusätzliche Simulationen mit der Finite-Elemente-Software LS-DYNA auf dem HPC in der BAW Karlsruhe sollen durchgeführt werden, um die vorhandene Datenbasis zu ergänzen. Schließlich soll über die Bildung dimensionsloser Größen die Anzahl der maßgebenden Parameter reduziert werden, so dass die gewonnenen Beziehungen vom Absolutmaßstab unabhängig sind und sowohl im Modell als auch in der Natur gelten.

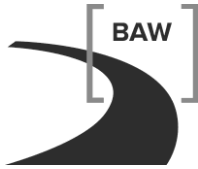
Daneben wird aus aktuellem Anlass der Fischabstieg über Wehre untersucht, bei der die Verletzungsgefahr maßgeblich vom Verschlusstyp, der Fallhöhe, dem Wasserpolster im Unterwasser und der Fischgröße abhängt. Im Rahmen einer Masterarbeit an der BAW soll der Fokus auf den überströmten Verschlusstypen liegen, wobei dem Schlauchwehr eine besondere Bedeutung zukommt, da es im Vergleich zu den anderen Verschlusstypen eine längere horizontale Wehrschwelle (Ablagetisch) besitzt. Ziel ist es, die Überströmung von Schlauchwehren qualitativ und quantitativ zu charakterisieren, um damit die Schädigungsgefahr für Fische besser einschätzen zu können. Die Masterarbeit wird bis Ende März 2013 abgeschlossen.

Im Dezember 2012 erfolgte durch PIANC der „Call for Members“ für die geplante Working Group 166 InCom on „Inflatable Structures in Hydraulic Engineering“. Die Thematik wurde auf Initiative der BAW in die PIANC-Inland Waterways Commission (InCom) eingebracht.

Laufzeit des Vorhabens von 2008 bis 2013.

5 Literatur

- Gebhardt, M.; Pfrommer, U.; Belzner, F.; Eisenhauer, N. (2012). Backwater effect of a Jambor weir sill. In: Journal of Hydraulic Research 50(3), 344–349.
- Belzner, F.; Gebhardt, M.; Pfrommer, U.; Eisenhauer, N. (2012): Entwicklung eines Bemessungsansatzes zur Dimensionierung einer Jambor-Schwelle auf Basis von Modelluntersuchungen. In: Tagungsband zum 35. Dresdner Wasserbaukolloquium 2012: Staubauwerke - Planen, Bauen, Betreiben.
- Gebhardt, M.; Maurer, A.; Schweizerhof, K. (2012): Schlauchwehre: Zur Formfindung, Berechnung und Bemessung der Membran. In: Tagungsband zum BAW-Kolloquium: Innovation mit Tradition: Hydraulischer Entwurf und Betrieb von Wasserbauwerken,



- 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.
- 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.
- Maurer, A.; Schweizerhof, K. (2012): Finite-Elemente Untersuchung von Schlauchwehren in Zusammenarbeit mit der BAW. Projektbericht. Institut für Mechanik, Karlsruher Institut für Mechanik (unveröffentlicht)

Optimierung der Befahrbarkeit von Flüssen

Netzplan-Nr.: A39530410035

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

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

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

Bei Beginn des Forschungsvorhabens existierten als einzige Berechnungsgrundlagen für die Einschätzung des Verkehrsflächenbedarfs von Binnenschiffen die Richtlinien für die Bemessung von Profilen in Schifffahrtskanälen und das Trassierungsverfahren TRASSE (seit 2011 Bestandteil der „Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschifffahrtskanälen“), welches Schleppkurven eines sich bewegenden Schiffes ermittelt. Beide Verfahren gelten ausschließlich für nicht fließende Gewässer. Für fließende Gewässer standen HN-Modelle zur Verfügung, allerdings ohne Bezug zur Fahrdynamik von Binnenschiffen. Um auch Anfragen aus der WSV, die die Fahrdynamik in fließenden Gewässern betreffen, bearbeiten zu können, 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 tiefenmittelten 2D-Strömungsfeldes berücksichtigt werden [Kolarov, P., 2006]. In diesem Verfahren werden die Schiffe nicht mehr geschleppt, sondern durch aufbringen von Ruderkräften gesteuert. Nach ersten erfolgreichen Tests des Verfahrens stellte sich heraus, dass die Schiffe mit Hilfe von Autopiloten nur begrenzt gefahren werden können. Eine Manöverfahrt ist nur durch einen Schiffsführer zu simulieren. Mit der Beschaffung des Schiffsführungssimulators im Dezember 2009 wurde eine leistungsfähige Plattform für die Weiterentwicklung fahrdynamischer Berechnungsansätze geschaffen. Damit können zukünftig qualitativ hochwertig Themen zur Navigation in Flüssen behandelt werden. Die Entwicklungen im Zusammenhang mit dem Binnenschiffsführungssimulator erfolgen im Rahmen des Forschungsvorhabens 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. Mit Einführung der neuen „Richtlinien für Regelquerschnitte von Binnenschiffahrtskanälen“ wird für fahrdynamische Bewertungen der Einsatz von dem Verfahren PeTra1D in Zusammenarbeit mit einem HN Modelle des zu untersuchenden Flusses empfohlen.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Entwicklungsarbeiten dieses FuE-Vorhabens sind abgeschlossen. Im Jahr 2013 wird der Forschungsbericht fertig gestellt.

Laufzeit des Vorhabens von 1996 bis 2013.

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 Fahrinnenbreiten zugunsten größerer Fahrinnentiefen kommen könnte oder in denen bereits Abschnitte gibt, in denen die Solltiefe der Fahrrinne nur auf eingeschränkter Breite vorliegt wie an der Donau im Abschnitt Straubing-Vilshofen oder am Rhein zwischen Koblenz und Köln. Ein besonderes Problem sind hierbei extreme Niedrigwasserereignisse, die im Zeichen der Klimawandels voraussichtlich vermehrt auftreten werden und bei denen eine geringere verfügbare Fahrwasserbreite mit einem vermehrten Verkehrsaufkommen zusammenfällt, wie es jüngste Niedrigwasserereignisse auf dem Rhein gezeigt haben. Zur Erkennung und Bewertung von Engpässen und daraus folgenden Empfehlungen für Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen bzw. zur Neufestlegung der Fahrrinne, wie sie für den Rhein seitens des BMVBS und der beteiligten Rheindirektionen in einem Auftrag an die BAW zu untersuchen ist, sind deshalb, neben der Kenntnis des Verkehrsflächenbedarfs von Bemessungsschiffen im Vergleich zur vorhandenen Fahrwasserbreite, auch die verkehrlichen Randbedingungen zu beachten. Hierzu ist das Verkehrsgeschehen zu simulieren.

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

Die Untersuchungen zielen auf die Entwicklung, Verifikation und Anwendung eines Verkehrssimulationsmodells für Binnenschiffe in Gewässern 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 Fahrinnenbreiten 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 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 wurde auf der Basis einer Marktanalyse Mitte 2012 eine Kooperation mit dem Institut für Wirtschaft und Verkehr, Lehrstuhl für Verkehrsökonomie und -statistik der TU Dresden [M. Treiber, A. et al, 2010] begonnen.

In einer ersten Phase der Projektbearbeitung wurden die inzwischen in der BAW verfeinerten semiempirischen Berechnungsverfahren zur Ermittlung des Verkehrsflächenbedarfs von Binnenschiffen aus Schlingelfahrt, Kurvenfahrt und Sicherheitsabständen sowie zu Schiffsgeschwindigkeit, Squat und Leistungsbedarf in die Modellumgebung der bestehenden Simulationsverfahren für Straßenverkehr eingefügt. Basis der Verkehrsflächenberechnung sind mittlere Kursachsen aus Naturuntersuchungen für Berg- und Talfahrten, die im Rahmen der Simulation hinsichtlich der Kursachsenkrümmung unverändert übernommen werden. Weiterhin verarbeitet das Programm Querprofile, die hinsichtlich der Breiten- und Tiefenverhältnisse zu interpretieren sind. Die zugehörige modelltechnische Umsetzung wurde 2012 begonnen. Weiterhin wurden im Jahre 2012 seitens der BAW Videobeobachtungen und AIS-Aufzeichnungen des laufenden Schiffsverkehrs an verschiedenen Abschnitten des Rheins durchgeführt. Aus diesen Daten sollen die verkehrlichen Eingangsdaten für Beispielrechnungen entnommen werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Im Arbeitsjahr 2013 werden die im Rahmen des WSV-Auftrages zur Fahrrinnenoptimierung am Rhein begonnenen Verkehrsbeobachtungen fortgesetzt und in Zusammenarbeit mit dem Auftraggeber ausgewertet. Weiterhin sollen die Bearbeiter des Vorhabens an der Uni Dresden Erfahrungen in der schiffahrtlichen Praxis sammeln. Es ist die Zusammenarbeit mit dem Institut für Mensch-Maschine-Interaktion der Uni Kassel vorgesehen, die im Rahmen des KLIWAS TP 4.4 im Auftrag der BAW an der Entwicklung eines „Mensch-Modells“ arbeitet, um die Modellierung des „human factor“, hier insbesondere hinsichtlich der Frage, wann Begegnungen oder Überholungen im engen Fahrwasser riskiert werden, zu vereinheitlichen. Schließlich ist die Verarbeitung aller semiempirischen Ansätze nebst Querprofilinterpretationen zum Abschluss zu bringen. Ende 2013 sollte deshalb ein erster Prototyp des Verkehrssimulationsmodells einsatzfähig sein. Anschließend ist die Anwendung des Verfahrens auf Musterstrecken an Ober-, Mittel- und Niederrhein vorgesehen. Das Ende des F&E-Projektes fällt mit der geplanten Dissertation des Bearbeiters der Uni Dresden zusammen, voraussichtlich 2015.

Laufzeit des Vorhabens von 2001 bis 2015.

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

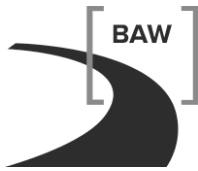
Langfristiges Ziel des Vorhabens ist es, die in der BAW entwickelten Verfahren zur Befahrbarkeitsanalyse im Hinblick auf den Aspekt Steinschlagschäden weiter zu entwickeln. Dadurch sollen insbesondere Prognosen zur Ermittlung praxisnaher Abladetiefen verbessert werden. Dabei ist der betriebswirtschaftliche 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 2012 wurden weitere Untersuchungen zugunsten des Vorhabens A39530410038 zurückgestellt.



4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Messung von 3D-Strömungsfeldern im Ansaugbereich von Schiffspropellern am LWI
2014: Voraussichtlicher Abschluss des Vorhabens

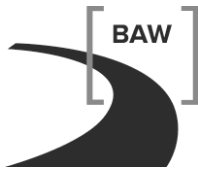
Laufzeit des Vorhabens von 2001 bis 2014.

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

Die durch den Schraubenstrahl induzierte Sohlenerosion ist ein sehr komplexer Vorgang und daher durch einfache 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 durch ihre Eignung für massiv-parallele Hardware (insbesondere General Purpose Graphics Processing Units, sog. GPGPUs) deutlich weniger Rechenzeit. Um ihre Anwendbarkeit für die Simulation der Schraubenstrahlausbreitung und der resultierenden Sohlenerosion nachzuweisen, werden im Rahmen des Projekts Validierungs- und HN-Berechnungen am Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen (iRMB) der TU Braunschweig durchgeführt.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die Untersuchungen führen zu einer Verbesserung der bestehenden Berechnungsverfahren zum Einfluss von Schraubenstrahlen auf die Sohlenerosion, die u. a. Eingang finden in die von der BAW für die Bemessung von Böschungs- und Sohlensicherungen an Binnenwasserstraßen entwickelten Software GBBSOft. Zudem können die Messdaten aus experimentellen Untersuchungen für die Kalibrierung und Weiterentwicklung von numerischen Verfahren herangezogen werden. Das Fernziel besteht im Einsatz eines geeigneten numerischen Verfahrens als Schnittstelle zum Softwarepaket GBBSOft, wodurch die Erweiterung und Verbesserung von analytischen Ansätzen für die Schraubenstrahlbelastung ermöglicht werden kann.

1.3 Untersuchungsziel

Die Arbeiten zu den experimentellen Untersuchungen am LWI wurden 2012 weitergeführt. Nach abschließenden Kolkversuchen infolge der Propellerstrahlbelastung eines an der Stelle verharrenden

modernen Großmotorgüterschiffes in der sog. Manövriersituation mit zwei Propeller-Ruder-Anordnungen, einem Wageningen-Propeller mit Zentralruder und einem Kaplan-Propeller mit Kortdüse und Doppelruder, wurden mit beiden Propellertypen vergleichende Versuche ohne Schiffsrumpf und ohne Ruder durchgeführt, um deren Einfluss auf die Kolkbildung zu eliminieren. Die Genauigkeit der im Rahmen des Forschungsprojektes bisher entwickelten Ansätze für die Prognose der Kolkentwicklung durch Propellerstrahlen war durch die Gegenüberstellung von Messergebnissen mit Berechnungsergebnissen zu überprüfen. Zur Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens von Schraubenstrahlen für die untersuchten geometrischen Randbedingungen mit beweglicher Sohle war zur Ermittlung des räumlichen Geschwindigkeitsfeldes der Propulsionsströmung das berührungslose optische Messverfahren „Particle Image Velocimetry“ (PIV) für Versuche mit fester Sohle einzurichten.

Weiterführende hydronumerische Validierungsberechnungen am iRMB zum Naturversuch am Wesel-Datteln-Kanal von 2005 mit dem Lattice-Boltzmann-Verfahren verfolgten die Zielstellung, die in den vorherigen Projektphasen benötigte Berechnungsdauer deutlich zu verkürzen. Angestrebt wurde eine Gesamtberechnungsdauer von maximal einer Stunde zur Simulation von 5 Minuten Echtzeit. Das Rechengebiet umfasst dabei einen Nachlaufbereich hinter dem Propeller, der eine Größe von etwa 50 Propellerdurchmesser aufweist.

2 Untersuchungsmethoden

Experimentelle Untersuchungen

Die Erfassung der Kolkentiefe und -geometrie im Sand- und Kiesbett für Manövriersituationen am stationären GMS-Hinterschiffsmodell (Gesamtabmessungen in der Natur: 110 m Länge, 11,45 m Breite) im Maßstab 1:16 erfolgte mit Stechpegeln und zeitlich hoch aufgelöst mit Ultraschallsonden.

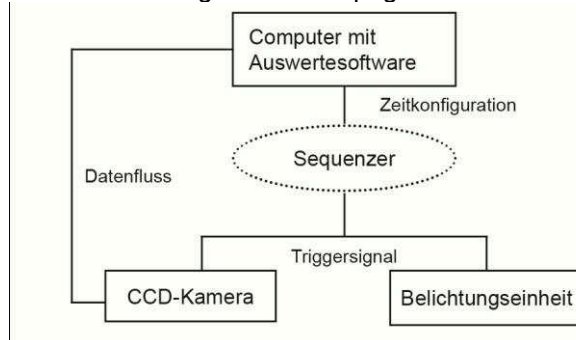


Bild 1: Schema zum Aufbau des PIV-Messsystems

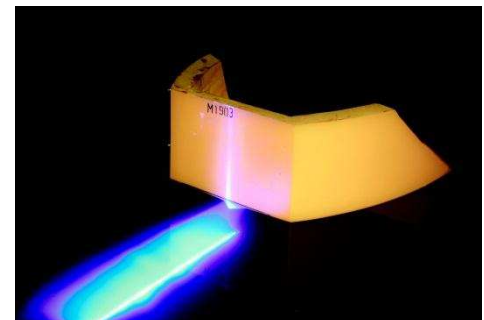


Bild 2: Lichtschnittebene des eingebauten LED-Arrays hinter dem Messschiff

Das PIV-Messsystem zur Ermittlung des räumlichen Geschwindigkeitsfeldes der Propulsionsströmung hinter dem Schiff besteht im Wesentlichen aus einer Belichtungseinheit, einer bildverstärkten Hochgeschwindigkeitskamera, einem Steuerungs-PC zur Datenaufzeichnung und Auswertung sowie dem sog. Sequenzier zur Synchronisierung des Messsystems und ist schematisch in Bild 1 dargestellt. Das Messprinzip beruht darauf, die Geschwindigkeit im Wasser enthaltener Partikel (Tracer) mittels Auswertung von jeweils zwei kurzzeitig hintereinander aufgenommenen Bildern anhand ihrer zeitlichen Verschiebung innerhalb einer erzeugten dünnen Lichtschnittebene zu bestimmen. Als Alternative zu üblichen laser-basierten Belichtungssystemen wird in den Untersuchungen am LWI als Belichtungssystem eine am Institut für Hydromechanik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) entwickelte LED-Linienbeleuchtung (LED-Array) verwendet (s. Bild 2).

Dreidimensionale hydronumerische Simulation der Schraubenstrahlausbreitung

Dem Simulationsmodell liegt ein Lattice-Boltzmann(LB)-Verfahren in einer neuentwickelten Cascaded-Lattice-Boltzmann(CLB)-Variante zugrunde, das als implizites Grobstruktur-Turbulenzmodell alternativ zu Smagorinsky-Ansätzen am iRMB weiterentwickelt wurde. Als geometrische Randbedingungen wurden die Schiffsgeometrie mit Antrieb (Propeller, Düse mit Spoiler, Doppelruder) und die vertikale Begrenzung durch die Wasseroberfläche sowie eine feste glatte bzw. raue Sohle mit einer Rauheit von etwa 20 cm berücksichtigt. Die Bewegung der Schiffsschraube wurde durch eine Geschwindigkeitsrandbedingung (Impulsscheibe) modelliert. Die radiale und tangentielle Geschwindigkeitsverteilung

lung wurde aus dem zuvor im Rahmen der Projektbearbeitung durchgeführten hoch aufgelösten Simulationslauf mit dem drehenden Propeller übertragen. Zur weiteren Beschleunigung der Berechnung wurden eine Verringerung der räumlichen Auflösung des Rechengebietes durch die Herabsetzung der Anzahl der Gitterpunkte und die Verwendung von Grafikprozessoren (GPUs) vorgenommen.

3 Ergebnisse

Die **experimentellen Untersuchungen** zeigen, dass sich die Kolkflächenentwicklung und Kolkgeometrie infolge der Belastung der Sohle aus den zwei hauptsächlich betrachteten Propeller-Ruder-Anordnungen, dem Kaplan-Düsenpropeller mit Doppelruder und dem Wageningen-Propeller mit Zentralruder, signifikant unterscheiden. Unerwartet ergaben die Messungen, dass die durch den Kaplan-Propeller hervorgerufenen Kolke ab einem von der Propellerdrehzahl abhängigen Zeitpunkt stets tiefer sind als die durch den Wageningen-Propeller verursachten Kolke, so dass für die wasserbauliche Bemessung von Deckschichten infolge einer kurzzeitigen Belastung der Wageningen-Propeller mit Zentralruder und für die Bemessung von Endkolkflächen der Kaplan-Düsenpropeller mit Doppelruder maßgebend ist.

Zur Verdeutlichung des Einflusses des Hinterschiffs auf die Kolkfläche wurden auch Versuche mit beiden Propellern ohne Ruderanlage am Schiff und als freie Propeller ohne Schiff durchgeführt. Die Kolkentwicklung wurde für diese Konstellationen über der Sandsohle und über der Kiessohle erfasst und ist in den Bildern 3 und 4 für identische Drehzahlen und Abstände der Propellerschnecke von der Sohle dargestellt. Bei der Interpretation der Ergebnisse ist zu beachten, dass der Kaplan-Düsenpropeller bei gleicher Drehzahl einen größeren Standschub entwickelt als der Wageningen-Propeller und sich durch die Anordnung der Propeller am Schiff Wechselwirkungen ergeben, die gegenüber dem freien Propeller zu einer Reduzierung des Schubs bei gleicher Drehzahl führen. Insgesamt verdeutlichen die Darstellungen jedoch den dämpfenden Einfluss des Schiffsrumpfes auf die Kolkflächenentwicklung. Versuche, gemessene Kolkflächenentwicklungen anhand bestehender und im Rahmen der Projektbearbeitung bisher vom LWI entwickelter Ansätze nachzurechnen, blieben bisher unbefriedigend und machten deutlich, dass für die korrekte Ermittlung der Kolkflächen weitergehende Kenntnisse über die Entwicklung des Abströmfeldes hinter dem Propeller und damit über die Größe der sohnahen Geschwindigkeit unerlässlich sind.

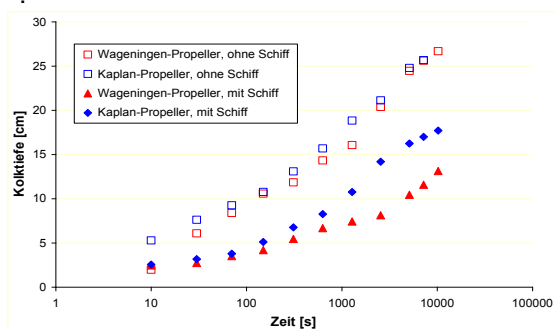


Bild 3: Kolkflächenentwicklung im sandigen Sediment für den Kaplan-Düsenpropeller und Wageningen-Propeller am Schiff und ohne Schiff

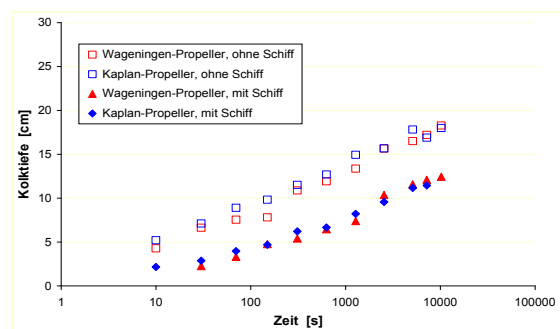


Bild 4: Kolkflächenentwicklung im kiesigen Sediment für den Kaplan-Düsenpropeller und Wageningen-Propeller am Schiff und ohne Schiff

Trotz der im Vergleich zu früheren **HN-Berechnungen** deutlich reduzierten Diskretisierung mit ca. 2% der Freiheitsgrade bezogen auf die frühere Untersuchung auf dem CPU-Cluster des iRMB ist deutlich die Auswirkung des verbesserten Turbulenzmodells (CLB) an der charakteristischen Ausbreitung des Propellerstrahles für die Randbedingung der glatten Sohle zu erkennen. Obwohl sich der Schraubstrahl gut identifizierbar schon nach weniger als 200 s bis zum Ausfluss (Gebietsrand) entwickelt (Bilder 5 und 6), führt die reduzierte Gesamtgebietsgröße zu einer großräumigen Oszillation. Bevor endgültige Aussagen im Vergleich zum hochaufgelösten CPU-Lauf unter Verwendung des Smagorinsky-Modells getroffen werden können, muss noch die Berücksichtigung der rauen Sole und die zeitliche Mittelung der Geschwindigkeiten erfolgen. Vorläufige Ergebnisse legen nahe, dass das neue

Turbulenzmodell deutlich sensibler auf die Rauigkeit der Sohle als in den früheren Berechnungen unter Verwendung des Smagorinsky-Modells reagiert. Dies äußert sich in einem deutlich turbulenteren Strömungsfeld, welches sich bereits in den ersten dreißig Sekunden der Simulation entwickelt. Für die Berechnung von ca. 95 s Echtzeit werden bei der raumzeitlichen Auflösung für den Testfall ohne raue Flusssohle und mit ca. 3 Mill. Gitterknoten ca. 4h und für den Testfall mit rauher Flusssohle und ca. 9 Mill. Gitterknoten zurzeit ca. 12 h Rechenzeit bei Verwendung einer TESLA C2075 GPGPU (448 Rechenkerne) benötigt. Der Einsatz der aktuellsten GPU-Version (Nvidia Kepler) würde die Simulation um ca. 40% beschleunigen. Die Beschaffung einer solchen Karte am iRMB ist in den nächsten zwei Monaten geplant. Die Verwendung von mehr als einer GPGPU wird die Rechenzeit näherungsweise linear reduzieren, allerdings sind hierzu noch Arbeiten bzgl. der Datenkommunikation zwischen den GPGPUs durchzuführen, die im Rahmen dieses Projektes zeitlich nicht mehr geleistet werden konnten.

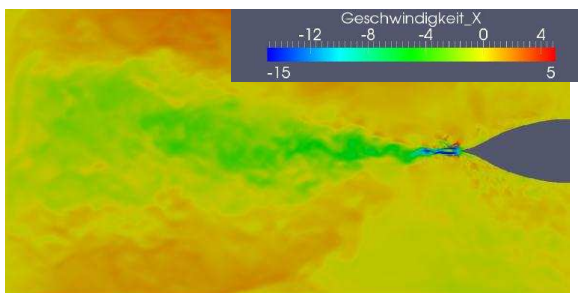


Bild 5: Draufsicht der Schraubenstrahlausbreitung mit der momentanen Geschwindigkeit nach ca. 168 s

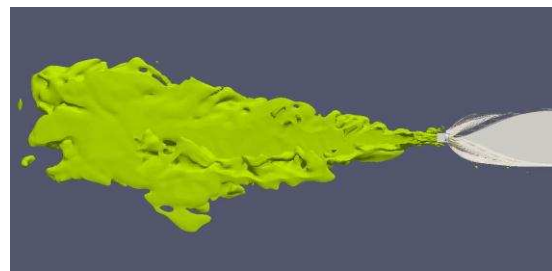


Bild 6: Draufsicht der Isofläche für 1 m/s nach ca. 168 s bis zum Ausfluss (Gebietsrand)

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die in den **experimentellen Untersuchungen** aufgenommenen Kolkgeometrien verdeutlichen, dass diese mit den unterschiedlichen Strahlausbreitungscharakteristiken der beiden Propeller-Ruder-Anordnungen in Verbindung stehen. Für die Untersuchung dieses Zusammenhanges werden 2013 Experimente durchgeführt, in denen das Strömungsfeld hinter dem Propeller und das sohnnahe Strömungsfeld mittels Particle Image Velocimetry (PIV) erfasst wird. Gegenstand dieser Untersuchungen ist auch die Ermittlung der Turbulenzeigenschaften der induzierten Strahlströmung. Die abgeschlossenen Untersuchungen mit dem ortsfesten Schiffsmodell werden im Weiteren durch Versuche am fahrenden Schiff zur Bestimmung der Kolkentiefe infolge kurzzeitiger Belastungen in Manövriersituationen, wie sie beim Anfahren und Aufstoppen auftreten, ergänzt.

Die transienten Ergebnisse der **HN-Berechnungen** zeigen in den hier vorgestellten vorläufigen Simulationen eine plausible Dynamik des Schraubstrahles. Zur weiteren Validierung muss noch die zeitliche Mittelung des Strömungsfeldes in den GPGPU-Kernel integriert werden. Mit den so berechneten zeitlichen Mittelwerten wird eine genauere Analyse der Schraubstrahldynamik, insbesondere zum vorherigen hochaufgelösten Simulationslauf auf dem CPU-Cluster unter Verwendung des Smagorinsky-Ansatzes, möglich sein. Diese Arbeiten werden Mitte 2013 abgeschlossen.

Laufzeit des Vorhabens von 2001 bis 2013.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

- Spitzer, D., B. Söhngen, J. Aberle und P. Geisenhainer (2012): „Belastung der Gewässersohle durch Propellerstrahlen, Teil 1: Untersuchungen bis zum Zweiten Weltkrieg.“ KW-Korrespondenz Wasserwirtschaft, 4/2012, 202–209.
- Spitzer, D., B. Söhngen, J. Aberle und P. Geisenhainer (2012): „Belastung der Gewässersohle durch Propellerstrahlen, Teil 2: Untersuchungen nach dem Zweiten Weltkrieg.“ KW-Korrespondenz Wasserwirtschaft, 6/2012, 321–330.
- Geisenhainer, P. und J. Aberle (2012): „Scale Model study of propeller-induced scour development.“ Int. School of Hydraulics 2012, accepted for publication in Springer Series: GeoPlanet: Earth and Planetary Sciences Series.
- Geisenhainer, P. & Aberle, J. (2012). „Experimental investigation of propeller jet induced scours.“ 2nd IAHR-Congress of the IAHR European Division, papers on memory-stick.
- LWI (2013): „Modellversuche zur Kolkbildung infolge eines Schraubenstrahlengriffs in einer Manöversituation.“ Endbericht (Entwurf), Leichtweiß-Institut für Wasserbau, TU Braunschweig, Januar 2013.
- Krafczyk, M. (2012): „Bericht zur Durchführung von Validierungs- und HN-Berechnungen zur Untersuchung der Schraubenstrahlausbreitung hinter einem stationären Großmotorgüterschiff mit dem Lattice-Boltzmann-Verfahren unter Verwendung von GPGPUs.“ Consultant Computational Engineering, Braunschweig, 15. November 2012.

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

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

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

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

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

2 Untersuchungsmethoden

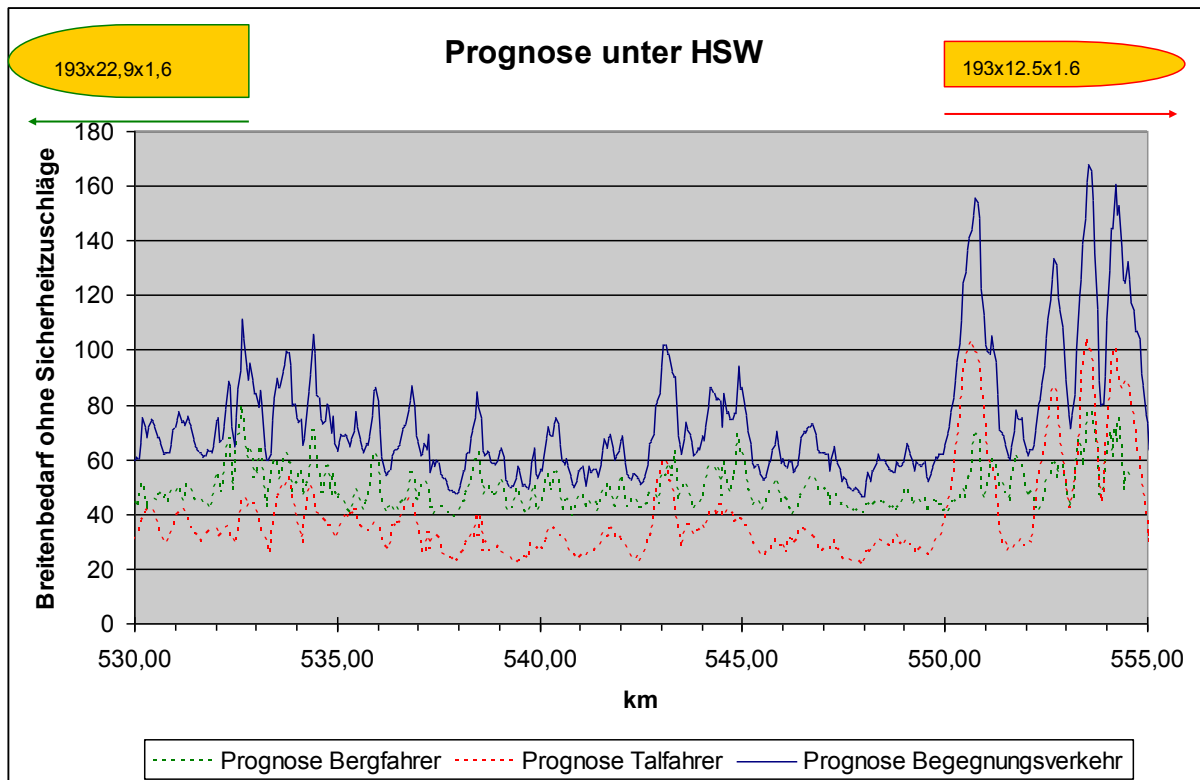
Die erforderlichen Mindestbreiten werden mit Hilfe von Naturdaten und fahrdynamischer Modelle bestimmt. Diese müssen die Instabilität des Schiffspfades, die verminderte Ruderwirkung bei geringen Wassertiefen, den Einfluss moderner Steuereinrichtungen, Autopiloten und verbesserte Informationssysteme auf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

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

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

3 Ergebnisse

Auf Grundlage der im vorangegangenen Berichtszeitraum erhobenen und ausgewerteten fahrdynamischen Naturuntersuchungen, wurde ein vorhandenes Verfahren, welches für Fahrrinnenbemessungen am Neckar Verwendung fand, für die Anwendung am Mittelrhein herangezogen und erste Anpassungen und Erweiterungen an die hier obliegenden Erfordernisse durchgeführt. Die in den Naturdaten enthaltenen Informationen, die mit den Programmen FAHRDYN (u.a. Kursachsen, Schleppflächen, generell deterministische Anteile der Fahrrinnenbemessung) und CfAA (Quer- und Drehbeschleunigungen und daraus ermittelte Zusatzbreiten aus Instabilitäten und „human factor“) aufbereitet werden, wurden in Verbindung mit 2D-Strömungsgeschwindigkeiten aus den TELEMAT-Simulationen im TP 4.03 zur Bestimmung idealisierter Fahrspuranteile aus Kurvenfahrt, Traversierung und Instabilitäten herangezogen. Durch einen SOLL-IST-Abgleich zwischen Theorie und Messung werden die theoretischen Formeln zur Ermittlung der Fahrspuranteile angepasst. Diese können dann auf Bemessungsszenarien wie die Fahrt großer Verbände bei HSW angewendet werden. Im Ergebnis ergeben sich Mindestbreiten der Fahrrinne mit ihrer Streubreite, denn die Prognosen erfolgen auf Basis verschiedener Messfahrten, siehe folgende Grafik, die Ergebnisse für die Begegnung einspuriger Schubverbände in der Tal- mit zweispurigen Verbänden jeweils max. zulässiger Längen in der Bergfahrt darstellt. Hierfür wurde auf Grundlage der Messdaten (von 6 Tal- und 5 Bergfahrten) Prognosen für das genannte Szenarium ermittelt und diese gemittelt. Die Ergebnisse sind noch nicht vollständig verifiziert und können sich noch ändern.



Weiter sollen die in einer ersten Phase der Untersuchungen anhand von Trassierungsverfahren abgeleiteten Mindestbreiten mit den vorher skizzierten semi-empirischen Ansätzen verglichen werden. Im Anschluss sollen Simulationen mit dem zweidimensionalen fahrdynamischen Modellverfahren PeTra2D, hinsichtlich der deterministischen Bemessungsanteile durchgeführt werden. Inwieweit es im Rahmen von TP 4.04 noch möglich sein wird, die Ansätze zum „human-factor“ im Rahmen eines modifizierten Autopiloten direkt zu berücksichtigen, ist derzeit noch nicht abschätzbar. Die Weiterentwicklung der Ansätze ist in den KLIWAS-Folgevorhaben vorgesehen.

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“)
- Konzept und Kodierung zur Modellierung des „human-factor“ im Autopiloten
- Durchführung der Modellrechnungen mit verbesserten Modellen in den Musterstrecken, Ermittlung der erf. Fahrrinnenbreiten und Ableitung von Anpassungsoptionen in Zusammenarbeit mit PJ 4.03
- Sensitivitätsbetrachtungen: Potenzial bessere Infosysteme, optimale Steuerung, flussangepasste Binnenschiffe.
- Prognosen der Mindestbreiten mit dem semi-empirischen Modellansatz
- Weiterentwicklung der Methodik und Anwendung mit Perspektiven für die Nutzung auf anderen Wasserstraßen.

Laufzeit des Vorhabens von 2008 bis 2014.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

- Dettmann, T.; Söhngen, B.: Fahrdynamische Modellverfahren. Vortrag: BAW-Kolloquium „Forschung und Entwicklung im Binnenverkehrswasserbau“. Karlsruhe, 2./3. März 2010. Veröffentlichung: Tagungsband
- Heinzelmann, C.; Söhngen, B.: Von Taktischen Drehpunkt zum Schiffsführungssimulator - Modellverfahren zur Fahrrinnenbemessung. Vortrag: 40. Internationales Wasserbausymposium Aachen (IWASA) „Innovative Methoden und Ansätze in Wasserbau und Wasserwirtschaft“, Aachen, 7. Januar 2010. Veröffentlichung: Tagungsband (Heinzelmann, C.; Söhngen, B.; Dettmann, T.)
- Schmidt, A.: Untersuchungen zu verkehrswasserbaulichen Anpassungsoptionen an extreme Niedrigwassersituationen am Beispiel des Rheins. Vortrag: HTG-Kongress, Würzburg, 7. bis 10. September 2011. Veröffentlichung: Tagungsband (Schmidt, A.; Wurms, S.; Hahne, L.; Söhngen, B.)
- Söhngen, B.; Wassermann S.: Mögliche Auswirkungen des Klimawandels auf die Schifffahrtsverhältnisse am Rhein. Vortrag: ZKR Kongress „Rheinschifffahrt und Klimawandel – Herausforderung und Chance“, Bonn, 26./27. Juni 2009.
- Söhngen, B.: Investigations to define minimum fairway widths for inland navigation channels. Vortrag: 32. PIANC Congress, Liverpool, Großbritannien, 12. bis 14. Mai 2010. Veröffentlichung: Tagungsband (Söhngen, B.; Dettmann, T.; Heinzelmann, C.)
- Söhngen, B.; Wassermann, S.: Ermittlung notwendiger Mindestfahrrinnenbreiten für eine sichere und leichte Schifffahrt. Vortrag: KLIWAS-Plenum, BfG, Koblenz, 6. September 2010.
- Söhngen, B.: Erforderliche Fahrrinnenbreiten in Flüssen. Vortrag: Workshop zum Thema „Zukunftsorientierte Fahrrinnenparameter für die Wasserstrasse Donau“, Donaukommision, Budapest, Ungarn, 29. September 2010.
- Söhngen, B.: Untersuchung einer Fahrrinne in der Fahrrinne für Teilstrecken des Mittelrheins als einer der möglichen Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel. Veröffentlichung: Tagungsband zum 31. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik/Meerestechnik 2010 (erschienen 2011)
- Wurms, S.: Additional navigational width of inland vessels passing cross current fields. Vortrag: Smart Rivers 2011 Conference, New Orleans, Louisiana, USA, 13. bis 16. September 2011. Veröffentlichung: Homepage der Smart Rivers 2011 Conference (http://smart11.pianc.us/ag_techprog.cfm) (Söhngen, B.; Maedel, N.; Hahne, L.; Verdugo, I.; Iribarren, J.)

Erweiterung des Binnenschiffsführungssimulators um die Berechnung schiffsinduzierter Wellen und Verbesserung des fahrdynamischen Modells

Netzplan-Nr.: A39530470003

Projektleiter: BOR T. Dettmann, Dipl.-Ing. R. Zentgraf, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Fachgruppe Schiffsführungssimulation (W 4), Referat 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 2009 wurde durch die Bundesanstalt für Wasserbau für den Bereich Binnenschifffahrt der 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 Bahnregler 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)]

Physikalische Methoden:

- Einmessung von fahrenden Binnenschiffen und Aufzeichnung aller Maschinen- und Ruderkommandos
- Entwicklung von Manöverfolgen zur Kalibrierung der Schiffsmodelle für den ANS5000 und Erstellung der Validierungsdokumente
- Durchführung von Schleppversuchen mit unterschiedlichen Schiffsmodellen inklusive Messung der Kräfte, die auf das Schiff wirken, und Messung der schiffsinduzierten Wellen und deren Ausbreitung.

3 Ergebnisse

Im Jahr 2011 wurden auf Grundlage des bereits entwickelten Messprogramms drei Schubverbände in unterschiedlichen Formationen eingemessen. Die Modellierung der Schubverbände für den Schiffsführungssimulator steht unmittelbar vor dem Abschluss. 2012 wurden weitere Naturuntersuchungen mit einem sechsgliedrigen Großschubverband durchgeführt. Die Erstellung des Modells für den Simulator findet 2013 statt,

Die Umsetzung des Verfahrens BoWave 2D auf eine Grafikkarte, um in größeren Fahrtgebieten schiffsinduzierte Wellen in Echtzeit zu rechnen, dauern noch an. Um BoWave 2D verifizieren zu können, wurden 2012 physikalische Modelluntersuchungen durchgeführt, bei denen ein Schiffsmodell bei Variation von Schiffsgeschwindigkeit, Drift und Uferabstand geschleppt wurde und die Kräfte am Schiffskörper sowie die Wellenausbreitung gemessen wurden.

Das im Vorfeld entwickelte Modell zur Berechnung der Kräfte eines Binnenschiffsruders wurde für die Rückwärtsfahrt erweitert und zusammen mit dem Modell für das Bugstrahlruder, welches den Einfluss der Wassertiefe unter dem Schiff berücksichtigt, in den ANS5000 integriert.

Ein umfangreiches Projekt, bei dem der ANS5000 zum Einsatz kam (die Ermittlung der Ursachen der Havarie des TMS Waldhof), ist abgeschlossen. Der Schiffsführungssimulator hat sich bei diesen Untersuchungen bewährt. Gegenwärtig werden drei neue Projekte auf dem Simulator bearbeitet.

Bei den Erweiterungen des ANS5000 hat sich herausgestellt, dass die PlugIn-Schnittstelle des ANS5000, mit deren Hilfe neue Modellverfahren in den Simulator integriert werden können, den Ansprüchen der BAW nicht genügt. Die Erweiterung der Schnittstellen wurde in Zusammenarbeit mit dem Hersteller des Simulators vorbereitet.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Laufzeit des Forschungsvorhabens ist von 2010 bis Ende 2016 veranschlagt. In diesem Zeitraum sind folgende Forschungsaktivitäten vorgesehen:

Entwicklung von Schnittstellen zwischen den Ergebnissen aus den HN-Modellen der BAW und dem ANS5000
Entwicklung eines Prä- und Postprozessors für das Wellenmodell BoWave, Anbindung an den ANS5000 und Portierung auf einen Grafikkartenrechner zur Reduzierung der Rechenzeiten
Verschmelzung fahrdynamischer Modellverfahren der BAW mit den im ANS5000 enthaltenen Verfahren
Modellierung der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße durch die Überführung der Ergebnisse aus dem Modellverfahren BoWave in die Strömungsdatenbasis des ANS5000
Entwicklung, Validierung und Codierung eines Modells zur Berechnung der Kraftwirkung von Bugrudderanlagen
Entwicklung, Validierung und Codierung des Modells zur Berechnung der Kraftwirkung von Heckrudderanlagen
Erweiterung der Kollisionsmodelle des ANS5000
Entwicklung eines neuen Squat-Modells durch Einführung einer Schwimmbedingung auf der Grundlage der Ergebnisse aus den Verfahren BoWave
Modellierung der Ansaugeffekte zum Ufer auf der Grundlage der Berechnungsergebnisse aus dem Verfahren BoWave
Entwicklung eines Autopiloten für Manöverfahrt
Durchführung von CFD-Rechnungen (Feldmethoden) zur Kalibrierung einzelner Modellverfahren

Die Reihenfolge der Abarbeitung der Aktivitäten richtet sich nach den Anforderungen laufender und eingehender Aufträge aus der WSV. Bis Ende 2013 stehen folgende Entwicklungen an:

- Entwicklung eines Prä- und Postprozessors für das Wellenmodell BoWave, Anbindung an den ANS5000 und Portierung auf einen Grafikkartenrechner zur Reduzierung der Rechenzeiten
- Erweiterung der PlugIn-Schnittstelle des ANS5000
- 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, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,
Referat Geotechnik Nord (K1)

E-Mail: martin.pohl@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

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

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

2 Untersuchungsmethoden

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

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

3 Ergebnisse

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

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

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

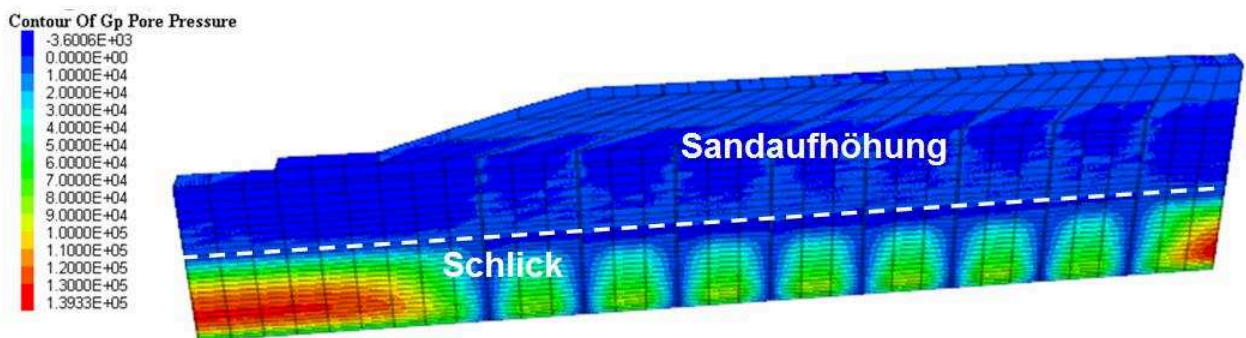


Bild 1: Porenwasserdruckverteilung im numerischen Simulationsmodell mit Vertikaldränagen und Sandaufhöhung

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

Hinsichtlich der Einflussfaktoren Durchlässigkeit des Schlicks, Sättigungsgrad und Wasserstand im Schlick sowie Durchlässigkeit der Sohle wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Hierdurch zeigte

sich, dass das Setzungsverhalten im numerischen Modell von den hydraulischen Randbedingungen und der Durchlässigkeit im Schlick dominiert wird.

Im Berichtszeitraum 2012 haben keine Untersuchungen und Forschungen stattgefunden.

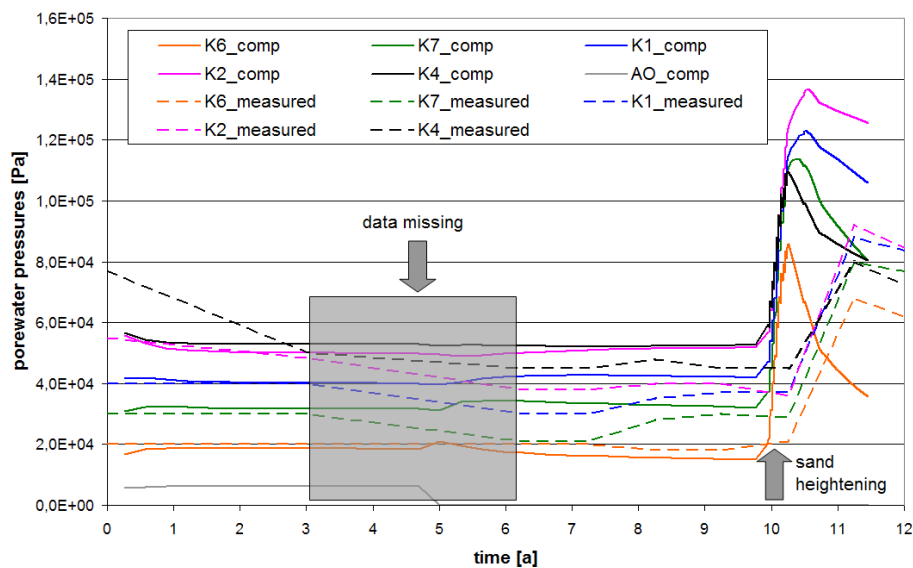
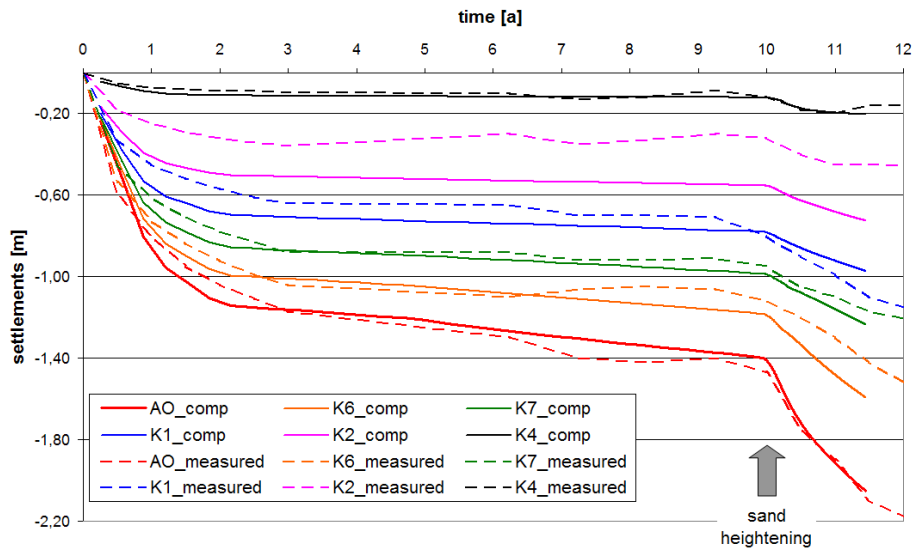


Bild 2: Vergleich der numerisch simulierten (Linien) mit physikalisch gemessenen (Strichlinie) Ergebnissen / oben: Setzungen, unten: Porenwasserdrücke

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013 - 2016: 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 Schlick.

Laufzeit des Vorhabens von 2002 bis 2016.

Bemessung korrodierter Stahlspundwände im Wasserbau

Netzplan-Nr.: A39550110158

Projektleiterin: Dipl.-Geol. A. Heeling (Mitarbeiterin: Dipl.-Ing. (FH) A. Jakobs),
Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Geotechnik Nord (K1)

E-Mail: anne.heeling@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Beurteilung des Korrosionszustandes einer Stahlspundwand erfolgt anhand der charakteristischen Werte der Korrosion „Mittlere Abrostung“ (→ Spannungsnachweis) und „Maximale Abrostung“ (→ Durchrostung), die sich derzeit zuverlässig nur mittels einer statistischen Auswertung von Ultraschall-Restwanddickenmessungen ermitteln lassen. Das Referat Geotechnik Nord hat dazu bereits in den 90er Jahren ein Verfahren zur Berechnung der Maximalen Abrostungen entwickelt.

1.2 Bedeutung für die WSV

Spundwände überbrücken Geländesprünge in Häfen und an Wasserstraßen und stellen daher ein im Zuständigkeitsbereich der WSV weit verbreitetes Bauteil dar, das wegen seiner statischen Funktion ständig hinsichtlich Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit zu beurteilen ist. Viele Spundwandbauwerke erreichen jedoch aufgrund lokaler Durchrostungen nicht die ursprünglich geplante Nutzungsdauer von 50 bis 80 Jahren. Darüber hinaus gibt es wirtschaftliche Bestrebungen „schlankere“, statisch höher ausgelastete Spundwandprofile einzusetzen, so dass eine Verminderung der Tragfähigkeit aufgrund korrosiver Wanddickenverluste von großer Relevanz ist.

Der zutreffenden Beurteilung des Korrosionszustandes auf Grundlage von Restwanddickenmessungen kommt somit eine hohe Bedeutung zu. Diese sind jedoch zeit- und kostenintensiv: Sie erfordern eine exakte Planung in Kenntnis der Örtlichkeiten. Die Vorbereitung (sorgfältige Reinigung der Messpunkte) und die Durchführung von Spundwanddickenmessungen erfolgen oft unter schwierigen Randbedingungen (Tauchereinsatz, strömendes bzw. trübes Wasser, Messeinsatz nahe intensiv genutzter Anlagen und bei Wellengang). Zudem gibt es zur Auswertung von Spundwanddickenmessungen auf dem freien Markt keine Standardsoftware; die BAW verwendet deshalb als Eigenentwicklung die Datenbankanwendung WaDiMe (= 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 „anomalen“ Löcher lassen sich deshalb (im Gegensatz zu den „normalen“) weder mittels einer statistischen Analyse aus den gemessenen Restwanddicken prognostizieren noch dürfen sie bei der Berechnung der statistischen Kennwerte der Korrosion berücksichtigt werden.

Diese Ergebnisse wurden

- 2005 im Rahmen des K1-Kolloquiums „Erfahrungsaustausch zur Planung, Bemessung und Ausführung von Uferwänden aus Stahlspundbohlen“,
- 2006 auf dem 31th PIANC Congress in Estoril, Portugal,
- 2007 auf dem HTG-Kongress in Dresden,

- 2009 auf dem Workshop „Spundwände – Profile, Tragverhalten, Bemessung, Einbringung und Wiedergewinnung“ der TU Hamburg-Harburg und
- 2010 auf der Fachtagung „Bauwerksdiagnose 2010“ in Berlin vorgestellt.

2008 wurde das WaDiMe-Programmpaket vollständig überarbeitet und benutzerfreundlicher gestaltet. Seitdem erfolgten zahlreiche Fehlerkorrekturen und Anpassungen. 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 Messungengenauigkeit des Incotest-Verfahrens unter realen Einsatzbedingungen so groß ist, dass keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden können. Ohne eine Weiterentwicklung des Wirbelstromverfahrens sind deshalb keine weiteren Vergleichsmessungen geplant.

Erste Labormessungen zeigten 2009, dass das Ultrabreitbandsonar-Verfahren der Fa. Evologics erwartungsgemäß (da es sich ebenfalls um ein auf Ultraschall basierendes Verfahren handelt), zutreffende Restwanddickenwerte liefert. 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 2013 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. Voraussichtlich im Februar 2013 wird die Fa. Domeyer GmbH & Co. KG, Bremen, der BAW ein speziell für den Tauchereinsatz entwickeltes Gerät zur Ultraschall-Schichtdickenmessung vorstellen, bei dessen Einsatz lt. Herstellerinformation auf eine Reinigung der Stahloberfläche weitestgehend verzichtet werden kann.

Laufzeit des Vorhabens von 2001 bis 2013.

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/in: Dr.-Ing. M. Pohl, Dipl.-Ing. L. Mittelbach, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,
Referat Geotechnik Nord (K1),

E-Mail: martin.pohl@baw.de, livia.mittelbach@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

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

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Bemessung von Deckwerken erfolgt derzeit auf Grundlage von Erfahrungswerten und physikalischen Modellansätzen (z.B. Hansen (1985), GBB (2010), EAK (1993 u. 2002)). Durch kleinmaßstäbliche Modellversuche und Beobachtungen in der Natur wird auf die Widerstandsfähigkeit des Deckwerks gegenüber den hydraulischen Einwirkungen geschlossen, wobei die Interaktion Seeschiff – Deckwerk bisher nur unzureichend untersucht wurde.

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 Deckwerksteinen als Ufersicherung eingebaut. Eine Bemessung von Deckwerken und Buhnen im Tidebereich ist häufig mit Unsicherheiten verbunden. Mitunter treten Deckwerksschäden auf, deren Ursachen nicht einhellig geklärt sind.

Durch eine numerische Analyse der lokalen Randbedingungen, d.h. hydraulische Belastung (Tide, 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) wird 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 und CCFD werden miteinander gekoppelt.

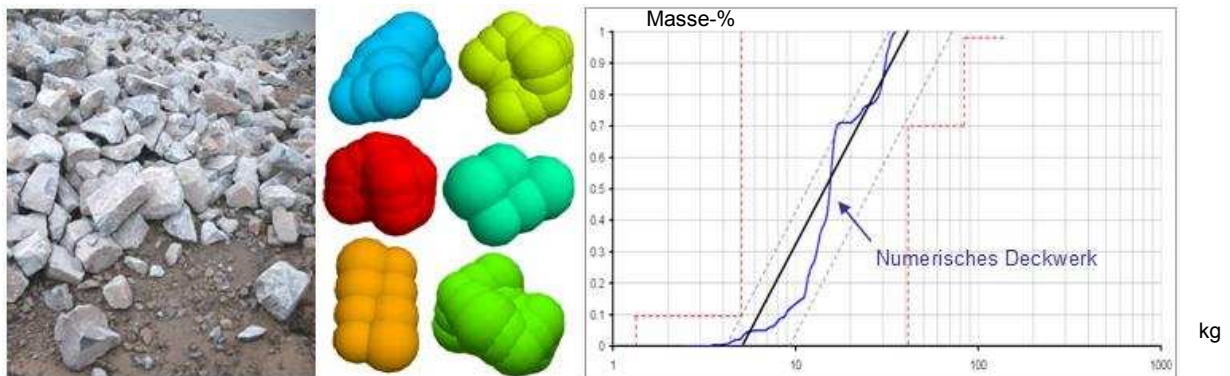


Bild 1: reale und numerische Deckwerkssteine (Beispiel), Summenkurve $LMB_{5/40}$

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

Reale Deckwerkssteine werden mit Messeinheiten zur Aufnahme von translatorischen und rotatorischen Bewegungen (Beschleunigungs- und Drehratensensoren) instrumentiert und in bestehenden Deckwerken eingebaut. 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. Wellen- und Strömungsbelastungen können grundlegend im CCFD abgebildet werden. Die Simulation von Wellenbelastungen erfolgt über die Aufgabe von zeitlich veränderlichen Randbedingungen wie Auslenkung der Wasseroberfläche und variierende Strömungsgeschwindigkeiten am Modellrand, welche im Folgenden eine auf das Deckwerk auflaufende Welle erzeugen. Es wurden verschiedene Szenarios mit unterschiedlichen Anfangsbedingungen und resultierendem Wellenangriff untersucht

und die Reaktionen am Deckwerk betrachtet Die Simulation von Schiffs- und Windwellen wird weiter präzisiert und auf den 3D-Fall erweitert.

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.

In der hydraulischen Rinne wurden Vorversuche an einem Deckwerksabschnitt mit einer Neigung von 1:1,5 und stufenweise Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit bis zu einem Maximum von 2,0 m/s durchgeführt. Die in den Modellversuchen infolge der Querschnittsverengung beobachtete Erhöhung der Strömungsgeschwindigkeit sowie der Abfall des Wasserspiegels und die Verlagerung der Deckwerkssteine konnten im numerischen Modell abgebildet werden (Bild 2). Weiterhin wurden im Rahmen der Modellversuche Prototypen der instrumentierten Deckwerkssteine in der hydraulischen Rinne getestet. Die Messergebnisse zeigten qualitativ den Beginn der Bewegung der Wasserbausteine infolge Überströmung.

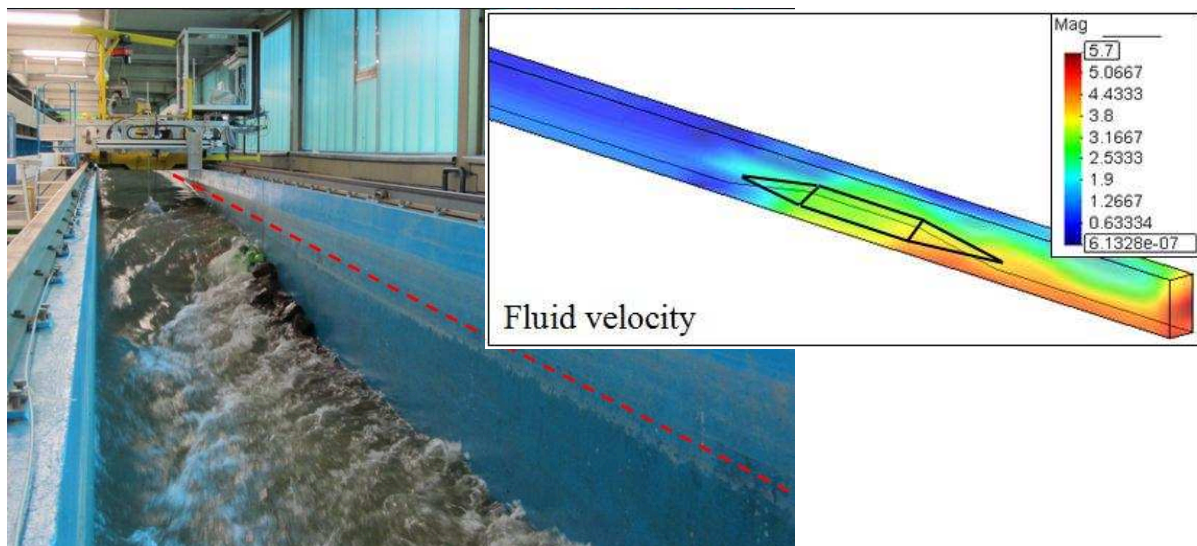


Bild 2: Modellversuch in hydraulischer Rinne und numerische Fluid-Simulation

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2013: Weiterentwicklung der Simulationsmodelle und Messsysteme sowie Durchführung von Modell- und Feldversuchen einschließlich Datenanalyse und numerischer Simulation der Ereignisse und Reaktionen
- 2014: Fortführung der Naturmessungen mit instrumentierten Deckwerksteinen und deren numerische Simulation, Simulation von überströmten Bühnen im Tidegebiet sowie sich bildender Porenwasserüberdrücke im anstehenden Boden
- 2015: Ermittlung der optimalen Deckwerksteinformen, -größen, -massen, -verteilungen, Deckschichtdicken, Fußstützungsarten und die Arten des Deckwerkbau für charakteristische Randbedingungen in den Ästuaren durch Parametervariationen und Programmerweiterungen.

Laufzeit des Vorhabens von 2008 bis 2015.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

BAW (2012): Böschungsdeckwerke unter Wellenbelastung. BAW-Mitteilungen Nr. 95 „Johann-Ohde-Kolloquium“, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe

Bestimmung der Widerstandsfähigkeit von Deichen

Netzplan-Nr.: A39550170318

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

E-Mail: martin.pohl@baw.de, thomas.nuber@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

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

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Ausbildung von Deichen geschieht derzeit auf der Grundlage von Erfahrungswissen sowie physikalischen Modellansätzen und analytischen Gleichungen. Analytische Nachweisführungen bestehen für verschiedene einzelne Versagensmechanismen. Derzeitig werden einzelne Aspekte für die Widerstandsfähigkeit von Deichen unabhängig 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 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

2012 wurden an Sonderproben, die im November 2011 an einem aus Mergel bestehenden Altdeich in Schleswig-Holstein gewonnen wurden, verschiedene Versuche durchgeführt. Bei der Auswertung der Ergebnisse für den Altdeich zeigte sich, dass der Wassergehalt (Bild 1) und die undränierte Scherfestigkeit c_u (Bild 1) sowohl des trockenen Mergeldeichs als auch des Mergeldeichs mit einer Wasserauflastdauer von 4 Stunden einen tiefenabhängigen Verlauf aufweisen. Infolge der Wasserauflast ergibt sich in den oberen 30cm der Deichabdeckung ein um etwa 10% bis 20% erhöhter Wassergehalt. Entsprechend verringert sich die undränierte Scherfestigkeit um bis zu 150kPa, was eine deutliche

Reduzierung der Standsicherheit der Deichabdeckung bedeutet (Bild1). Zugehörige Triaxialversuche wurden ebenfalls durchgeführt.

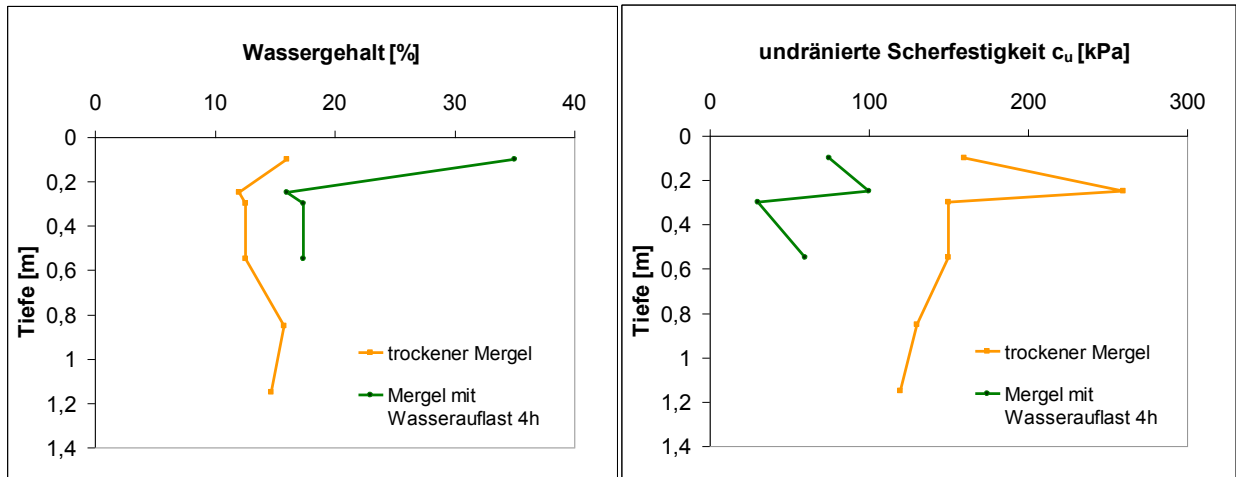


Bild 1: Wassergehalt und undrained Scherfestigkeit über die Tiefe der Deichabdeckung bei einem Mergel-Altdeich

Mit dem Programm FLAC3D wurde ein parametrisiertes Deichmodell für die Eingabe variabler Deichgeometrien, d.h. Deichhöhe, Neigungen, Mächtigkeit der Deichabdeckung erstellt. Eine lagegenaue sowie zeitabhängigen Zuweisung von Bodenparametern in Form von Kraft- / Spannungs-Dehnungs- sowie Kompressions-Kurven – entsprechend der Laborversuchsergebnisse - durch hinterlegte Tabellen erlauben die numerische Ermittlung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Weitere Infiltrationsversuche und Probenahmen an den o.g. Mergeldeichen

Durchführung einer Machbarkeitsstudie für den Planung und Neubau eines Deiches unter definierten Randbedingungen; Weiterentwicklung des numerischen Modells - Hinterlegung der Bodenzustandsparameter, Durchführung von Modellrechnungen und Parameterstudien mit dem Numerischen Modell

2013-2015: Untersuchungen an bestehenden Deichen (Mergel, Klei, Baggergut) sowie an dem neu zu errichtenden Deich; Verifizierung von derzeitigen analytischen Modellvorstellungen

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2015.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

-/-

Wechselwirkung Seeschiff / Seeschiffahrtsstraße - Schiffsdynamik

Netzplan-Nr.: A39550210055

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

Abgesicherte, quantitative Prognosen des dynamischen Fahrverhaltens (Squat und Trimm) im seitlich begrenzten, extremen Flachwasser sind mit der Methode des hydraulischen Modellversuchs in einem fachlich hinreichenden Maßstab gewährleistet. Des Weiteren sind derzeit für eine abgesicherte Bearbeitung der Aufgabenstellung validierte und international anerkannte hydrodynamisch-numerische RANSE-Verfahren als annähernd gleichwertig zum Modellversuch anzusehen.

Die Weiterentwicklung potentialtheoretischer Verfahren im Auftrag der BAW für die Belange der WSV zeigte bei engen Seeschiffahrtsstraßen wie z.B. dem NOK die Grenzen der Einsatzmöglichkeiten dieser Verfahren auf, so dass nach intensiver Fachdiskussion vorerst die Methodenentwicklung sowohl zur Erfassung weiterer Validierungsdaten in der Natur als auch Verfahren zur Qualitätssicherung der Daten Dritter durch die BAW als vordringliche Entwicklungsarbeit erachtet wurde.

1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund der Größenentwicklung der Containerschiffahrt (Inbetriebnahme von 14.000 TEU-Containerschiffen in 2010) und der begrenzten Ausbaupazität der Seeschiffahrtsstraßen wird zukünftig deren Befahrbarkeitsanalyse für eine optimale Nutzung durch die Schifffahrt eine wachsende Bedeutung hinsichtlich der Schiffsdynamik, aber auch bezüglich der wirtschaftlichen Unterhaltung der Schifffahrtsstraßen (z.B. schiffserzeugte Belastungen der Ufer) bekommen. Eine detaillierte Kenntnis u.a. der Schiffsdynamik (Squat, Trimm, Bank-Effekt und Schiff-Schiff-Interaktion) 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.

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 wurden für verschiedene Schiffe (z.B. PanMax-Containerschiff $l = 300$ m, $b = 32,2$ m, $t = 9,5$ m, $h/t = 1,16$ im NOK-Profil mit $n = 3,8$) vorhandene numerische Verfahren (in diesem aktuellen Projektzeitraum potentialtheoretische Verfahren) geprüft und deren Weiterentwicklung beauftragt. Darüber hinaus sollten 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.

3 Ergebnisse

Für die WSV konnte anhand der Fachdiskussion Anfang 2012 aus den vorliegenden Projektergebnissen die Erkenntnis abgeleitet werden, dass eine direkte Berechnung des fahrdynamischen Verhaltens von Schiffen für geometrisch enge Querschnitte wie z.B. dem NOK mit potentialtheoretischen Berechnungsverfahren bei dem derzeitigen Entwicklungsstand für die Belange der WSV am NOK nicht empfohlen werden kann. Dagegen waren Berechnungen nach Stand von Technik und Wissenschaft mit rechnerisch und zeitlich aufwändigen, hochauflösenden, reibungsbehafteten RANSE-Modellen für die Tauchung (Squat) und den Trimm anhand von Messergebnissen aus hydraulischen Modellversuchen der BAW mit hinreichendem Maßstab validiert.

Nach einer intensiven Fachdiskussion mit den Entwicklern potentialtheoretischer Verfahren wurde der Versuch, ein schnell rechnendes Werkzeug für die Prognose der Schiffsdynamik in engen Querschnitten weiter zu entwickeln, vorerst ausgesetzt.

Zur Evaluierung des potentiellen Marktes über die bisher bekannten Institute hinaus erfolgte von Seiten der BAW eine Beteiligung an der internationalen Ausschreibung des Benchmark-Tests PreSquat zusammen mit dem Institut für Schiffstechnik, Meerestechnik und Transportsysteme (ISMT) der Universität Duisburg-Essen und dem Germanischen Lloyd SE, Hamburg (http://www.uni-due.de/IST/ismt_presquat.shtml). Die Ergebnisse werden auf dem internationalen Workshop „Numerical Prediction of Squat in Restricted Waters“ am 04.09.2013 in Duisburg vorgestellt und diskutiert. Es wird erwartet, dass aufgrund der Beteiligung verschiedenster Institutionen an dem Vergleichstest numerischer Verfahren Empfehlungen für die WSV hinsichtlich der Verwendung – auch potentialtheoretischer – numerischer Verfahren zur Prognose der Schiffsdynamik abgeleitet werden können.

Da die BAW derzeit zur weiteren Absicherung und Validierung des Tidefahrplans Elbe das WSA Hamburg hinsichtlich der Ausschreibung von Messungen zur Schiffsdynamik großer Containerschiffe bei Revierfahrt berät, wurde im Rahmen des FuE-Projekts in 2012 die Methodenentwicklung sowohl zur Erfassung der Validierungsdaten in der Natur als auch zur erforderlichen Qualitätssicherung der Daten Dritter durch die BAW in den Vordergrund gestellt.

Das von der BAW aufgrund von Erfahrungen aus eigenen Messungen zur Schiffsdynamik (BAW, 2006) als Grundlage für die Messkampagnen entwickelte Bearbeitungskonzept wurde schematisch in der folgenden Abbildung dargestellt. Das detaillierte Messkonzept wird mit dem Auftragnehmer (AN) hinsichtlich der fachlich abgesicherten Umsetzung des Auftrags abgestimmt und die externe Qualitätssicherung durch die BAW mit dem AN abgesprochen.

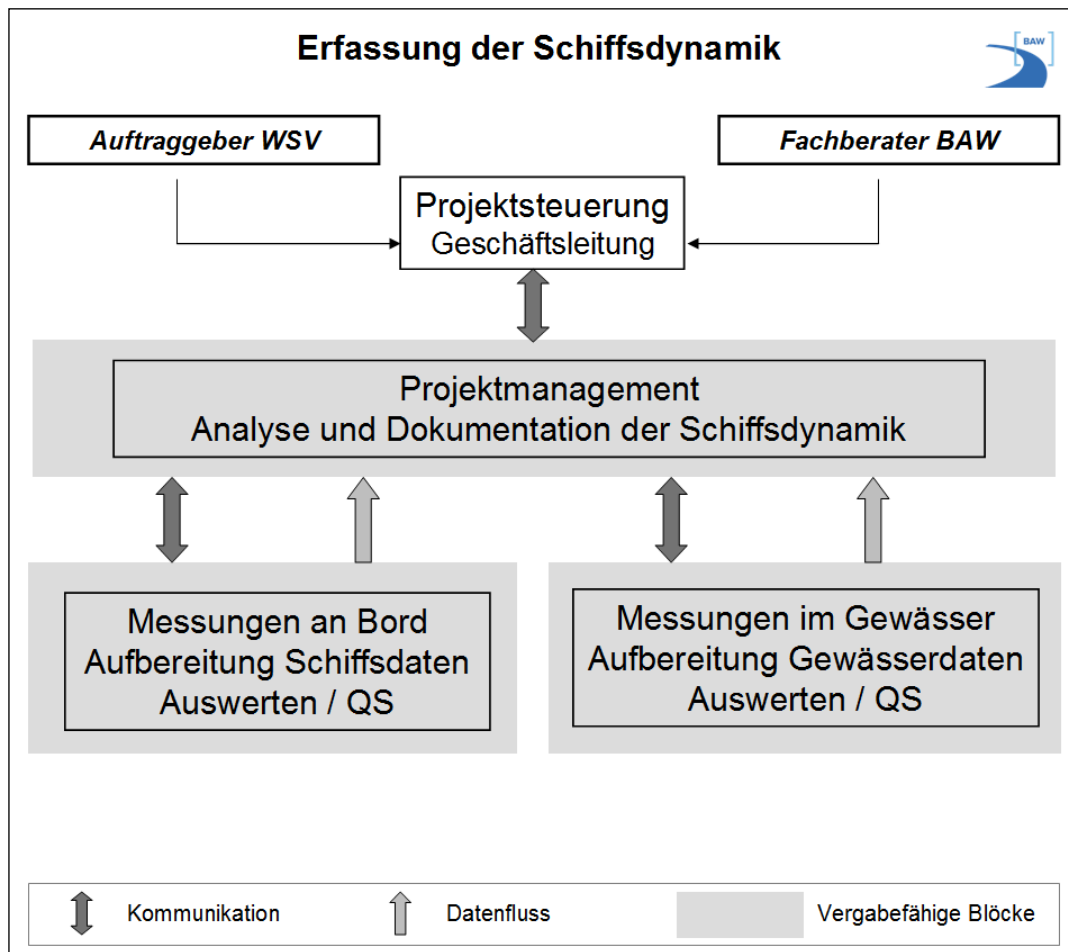


Bild 1: Ausgangskonzept zur Erfassung und Qualitätssicherung der Schiffsdynamik (u.a. Squat, Trimm) auf Seeschiffahrtsstraßen (schematisch)

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Mit der Vergabe des Projektmanagements und der Durchführung der Messkampagnen fallen für die BAW umfangreiche Entwicklungsarbeiten zur Qualitätssicherung bezüglich der durch den AN zu erfassenden und zu bearbeitenden Daten an. Die von der BAW zu entwickelnde Methodik zur Qualitätssicherung ist über die gesamte Zeit der Projektdauer (ca. 30 Monate für ca. 20 Messkampagnen) an die Erfahrungen mit dem AN anzupassen.

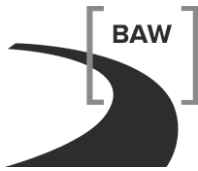
Laufzeit des aktuellen Vorhabens von 2002 bis 2015.

5 Literatur

- / -

6 Veröffentlichungen

Uliczka, K. Kondziella, B. (2006): Dynamisches Fahrverhalten sehr großer Containerschiffe unter extremen Flachwasserbedingungen, Deutsche Beiträge, 31. Internationaler Schifffahrtkongress Estoril/Portugal, Bonn



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

Netzplan-Nr.: A39550270116

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

E-Mail: harro.heyer@baw.de

1 Problemstellung und Ziel

Seit etwa drei Jahrzehnten werden mathematische, prozessbasierte Simulationsmodelle entwickelt und gepflegt, mit denen Wasserstände, Strömungen, Seegang und der Transport im Wasserkörper gelöster Substanzen berechnet werden, und darüber hinaus auch der Transport von Sedimenten abgeschätzt werden kann. Darauf aufbauend werden mögliche Veränderungen der Bathymetrie (Morphodynamik) und der Sedimentologie bestimmt. 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 endete am 31.12.2012. Es ist geplant, wesentliche Ergebnisse des Vorhabens für den Aufgabenkatalog der Ressortforschung zu übernehmen, um Herausforderungen der Zukunft bewältigen zu können, die mit wichtigen Fragen zu den zukünftigen Belastungen und Veränderungen der Küstengewässer (Klimawandel) und zum vorausschauenden Management der Seeschiffahrtsstraßen verbunden sind.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

Die BAW trägt zum Gesamtvorhaben durch 3D-Modellierungen des Gesamtsystems Nordsee, Deutsche Bucht, Wattenmeer und Ästuare in hoher Auflösung bei. Die Modellvalidierung erfolgt für Zeitspannen von mehreren Jahren auf der Grundlage konsistenter bathymetrischer Daten. Eingesetzt werden Modellverfahren zur Berechnung der Wasserstände, Strömungen, Salzgehalte, Schwebstofftransporte, Sedimenttransporte am Boden, des Seegangs und der von diesen Prozessen ausgelösten Veränderungen der Morphologie. Zur Einschätzung der numerischen Lösungsverfahren werden zwei verschiedene Modellsysteme verwendet: Das unstrukturierte hydrodynamische Modellverfahren UnTRIM gekoppelt mit dem Sedimentmodul SediMorph und dem Seegangmodell UnK einerseits und das hydro-morphodynamische Verfahren Delft3D mit dem Seegangmodell SWAN andererseits. 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 für mehrere Jahreenthält. Das Bodenmodell dient einerseits als Datengrundlage für den Betrieb der Simulationsmodelle und andererseits erzeugt es Informationen zur Validierung / Kalibrierung dieser Modelle. Darüber hinaus wird von einem Projektpartner eine Studie zur Verteilung, Dynamik und Wirkung von Bodenformen (Transportkörper, Dünen am Gewässerboden) erarbeitet. Resultate dieser Untersuchungen sollen als Elemente in den numerischen Modellsystemen zur Verbesserung der Simulationsergebnisse beitragen.

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

3 Ergebnisse

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

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

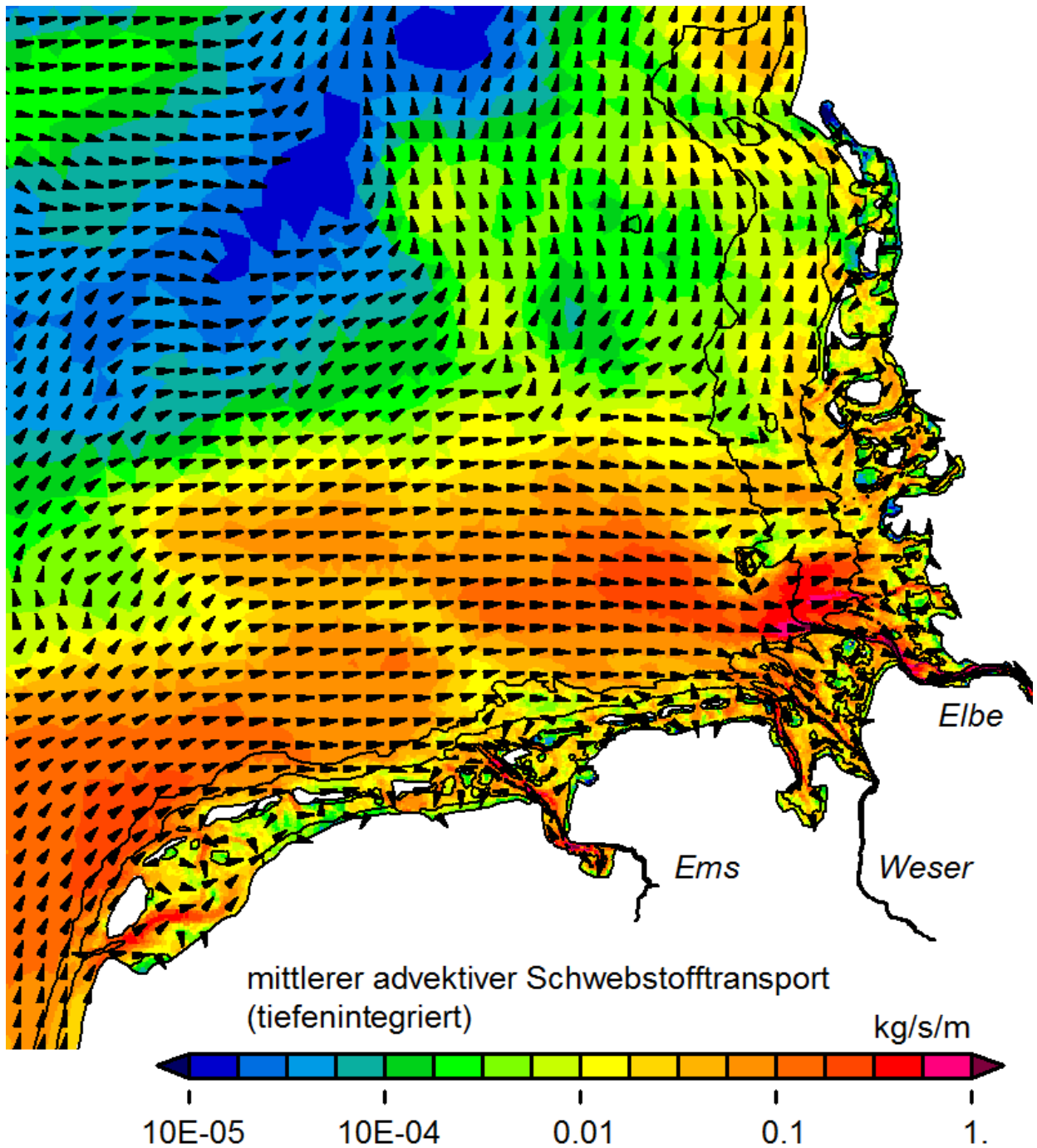


Bild 1: Mittlerer advektiver Schwebstofftransport in der Deutschen Bucht (Jahresmittel 2006)

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

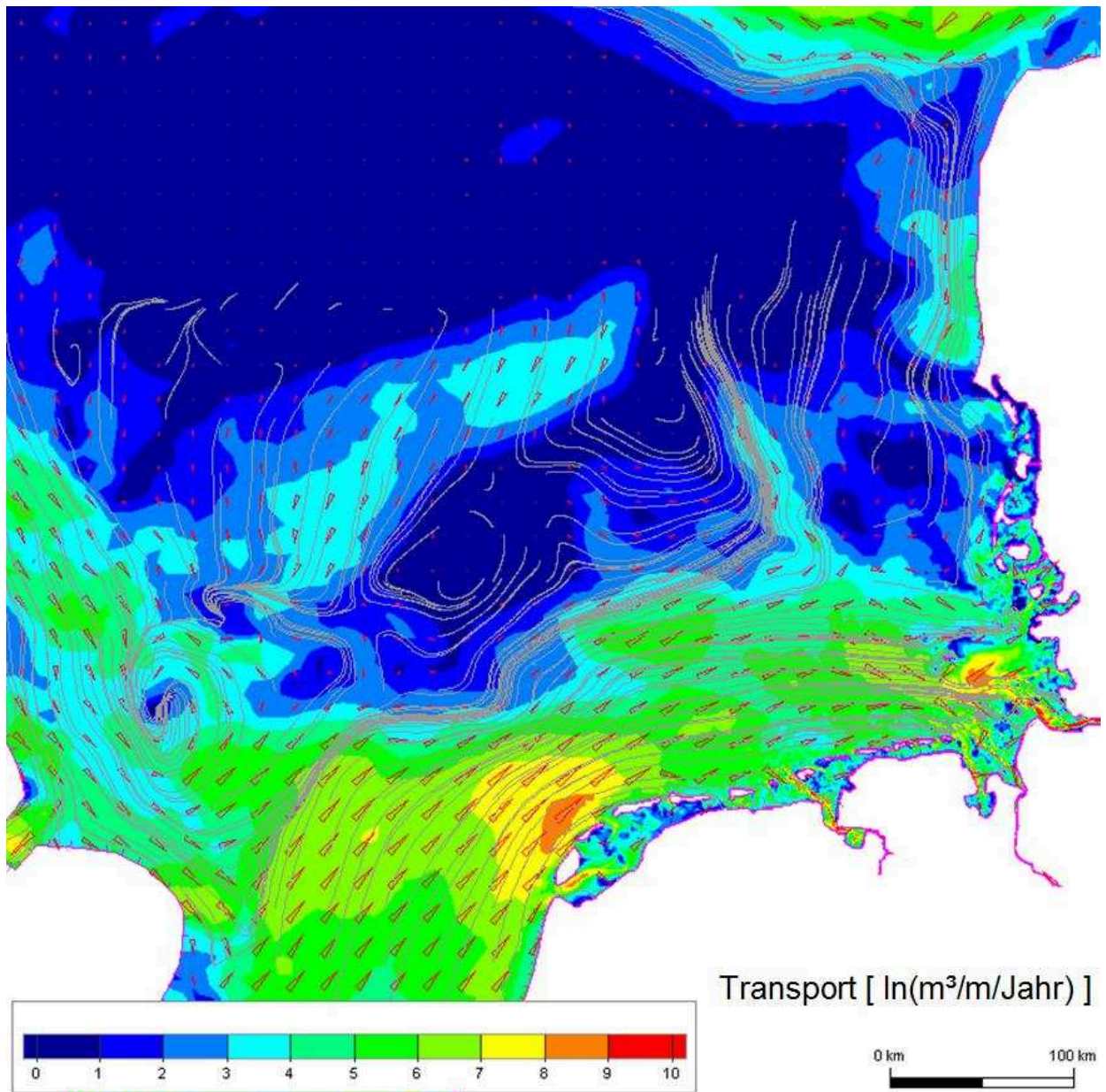


Bild2: Sedimenttransportpfade (Analyse aus den resultierenden Transportvektoren eines Jahres)

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 Ästuarie 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

2013: Erstellung eines abgestimmten Abschlussberichtes für jedes Teilprojekt sowie ein gemeinsamer Abschlussbericht für das Verbundprojekt. Veröffentlichung in wissenschaftlichen Fachzeitschriften (Die Küste, ...).

Laufzeit des Vorhabens von 2009 bis 2013.

5 Literatur

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

6 Veröffentlichungen

- Kösters, F. 2011. "Using UnTRIM2007 in large scale applications: the BAW North Sea model", UnTRIM User meeting, 09.05.2011, Trient, Italien
- Kösters, F., A. Plüß, M. Kastens und H. Heyer, 2011. „Long-term morphodynamic modeling of the German Bight – model set-up and validation“, 5th Short Conference on Applied Coastal Research (SCACR), 07.06.2011, Aachen, Deutschland
- Kösters, F. 2011. Using UnTRIM2007 in large-scale applications: the BAW North Sea model UNTRIMUsers Workshop, Trient, Italien, 9. bis 11. Mai 2011
- Kösters, F. and Plüß, A. 2012. Large-scale morphodynamic modeling of the German Bight – Assessing meteorological effects, PECS 2012, New York, August 2012
- Kösters, F. 2012. Sediment transport in the German Bight - Numerical modeling and observational results from the AufMod project, Invited talk at PACE Workshop, Texel, Netherlands, September 2012
- Valerius, J. und Kösters, F. 2012. Aufbau von integrierten Modellsystemen zur Analyse der langfristigen Morphodynamik in der Deutschen Bucht, KFKI Kolloquium, Bremerhaven, November 2012
- Wosniok, C. 2012. Symposium für Geoinformation für die Küstenzone, 24.+25.10.2012, Hamburg 17. KFKI-Seminar Bremerhaven, 28.11.2012

Schiffsführungssimulation der Revierfahrt (SFS-R)

Netzplan-Nr.: A39550270132

Projektleiter: Dr.-Ing. C.-U. Böttner, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

E-Mail: carl-uwe.boettner@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Schiffsführungssimulatoren werden seit den 60er Jahren erfolgreich in der Aus- und Weiterbildung von nautischem Personal eingesetzt. Da seither die Schiffsgrößen kontinuierlich gesteigert werden, sind auch die Kosten für die Bereitstellung und Unterhaltung der Wasserstraßen überproportional gestiegen. Einsparungen sind nur möglich, indem der Dimensionierung der Seeschiffahrtstraße ein hohes Gewicht eingeräumt wird und diese nur in den Dimensionen 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 einen 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 Phänomene spürbar und erfahrbar sein müssen.

Ziel dieses Vorhabens ist es daher, fahrdynamische Modelle bestehender Schiffsführungssimulatoren so zu verfeinern, dass sie für die Simulation der Revierfahrt von Seeschiffen erweitert und ergänzt werden. Dies soll nach Möglichkeit so erfolgen, dass die WSV diese Entwicklungen in einer Simulation zur Bemessung verwenden kann, ohne dafür in der Wahl des Simulators oder Simulatorbetreibers eingeschränkt zu sein.

1.2 Bedeutung für die WSV

Eine fachlich abgesicherte Möglichkeit zur verbesserten Ausnutzung der Seeschiffahrtsstraßen bietet ein immenses Einsparpotential bei den Unterhaltungskosten. Dabei muss im Vorfeld der Nachweis der Gewährleistung der Leichtigkeit und Sicherheit des Verkehrs trotz möglichst wirtschaftlicher Bemessung erbracht werden können, um erhöhte Folgekosten für nachträgliche Anpassung der Wasserstraße und Reparaturen durch Unfälle auszuschließen.

1.3 Untersuchungsziel

Ermittlung und Festlegung der notwendigen Präzision der fahrdynamischen Modelle in der Schiffsführungssimulation zur Absicherung der Bemessung. Parallel dazu Entwicklung von Modellen und Ansätzen der Fahrdynamik von Seeschiffen bei Flachwasserbedingungen entsprechend den ermittelten Vorgaben und deren Bereitstellung zur Einbindung in Schiffsführungssimulationen zur Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse.

2 Untersuchungsmethoden

Es werden verschiedene Methoden verfolgt und eingesetzt. Zunächst wird eine Sensitivitätsstudie zur Bedeutung der unterschiedlichen Anteile der Fahrdynamik für die Bemessung der Wasserstraße

durchgeführt. Hier werden die einzelnen fahrdynamischen Größen und Effekte gemeinsam mit der jeweiligen notwendigen Genauigkeit für eine belastbare, wirklichkeitsgetreue Simulation der Revierfahrt ermittelt. Daraus ergeben sich direkt die Aufgaben für die Entwicklung der einzelnen analytischen Ansätze und fahrdynamischen Modelle. Im letzten Schritt werden diese in Form von Modellmodulen zur Verwendung bei Simulationen der Revierfahrt in Schiffsführungssimulatoren aufbereitet und der WSV bereitgestellt. Die Entwicklung der analytischen Ansätze und fahrdynamischen Modelle baut auf den Ergebnissen (in Form von Validierungsdaten und analytisch funktionalen oder tabellarischen Eingabewerten) der beiden anderen Teilprojekte der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff – Seeschiffahrtstraße auf.

3 Ergebnisse

Zu der in 2010 durchgeführten Fast-Time Simulation des Wendemanövers auf der Wendestelle Emden wurde eine Abschlussbesprechung mit Präsentation und Diskussion der Ergebnisse im WSA Emden durchgeführt. Der Vergleich mit den Ergebnissen aus der Full-Mission Simulation am Simulator der Versuchsanstalt MARIN zeigte hohe Übereinstimmung in den Aussagen und Schlussfolgerungen. Dies zeigte sich beispielsweise in der unabhängigen, identischen Empfehlung für eine Grenzwindgeschwindigkeit, ab der das Wendemanöver nicht mehr sicher durchgeführt werden kann. Die **Sensitivitätsstudien** zum Bank Effekt im Schiffsführungssimulator der BAW wurden vorerst abgeschlossen. Das Ergebnis dieser Studien ist, dass die Ermittlung des Bank-Abstands im Simulator mit ausreichender Genauigkeit arbeitet. Die auftretenden Bankkräfte und –Momente haben einen deutlichen Einfluss auf Bemessung und Befahrbarkeitsanalyse. Folge dieser Sensitivität ist einerseits, dass in einem Schiffsführungssimulator das mathematische Modell für die Bankeffekte mindestens zweiter Ordnung sein muss und ausreichend Koeffizienten und Eingriffsmöglichkeiten bieten muss. Andererseits wird die Dringlichkeit verfügbarer Messwerte deutlich. Ergänzend zu den Messungen im Modellversuch zum Bankeffekt im Rahmen der Fachaufgabe Wechselwirkung Seeschiff Seeschiffahrtsstraße (FuE Schiffsdynamik) werden daher im FuE – Projekt SHD-F numerische Strömungssimulationen zum Bank-Effekt entwickelt und durchgeführt.

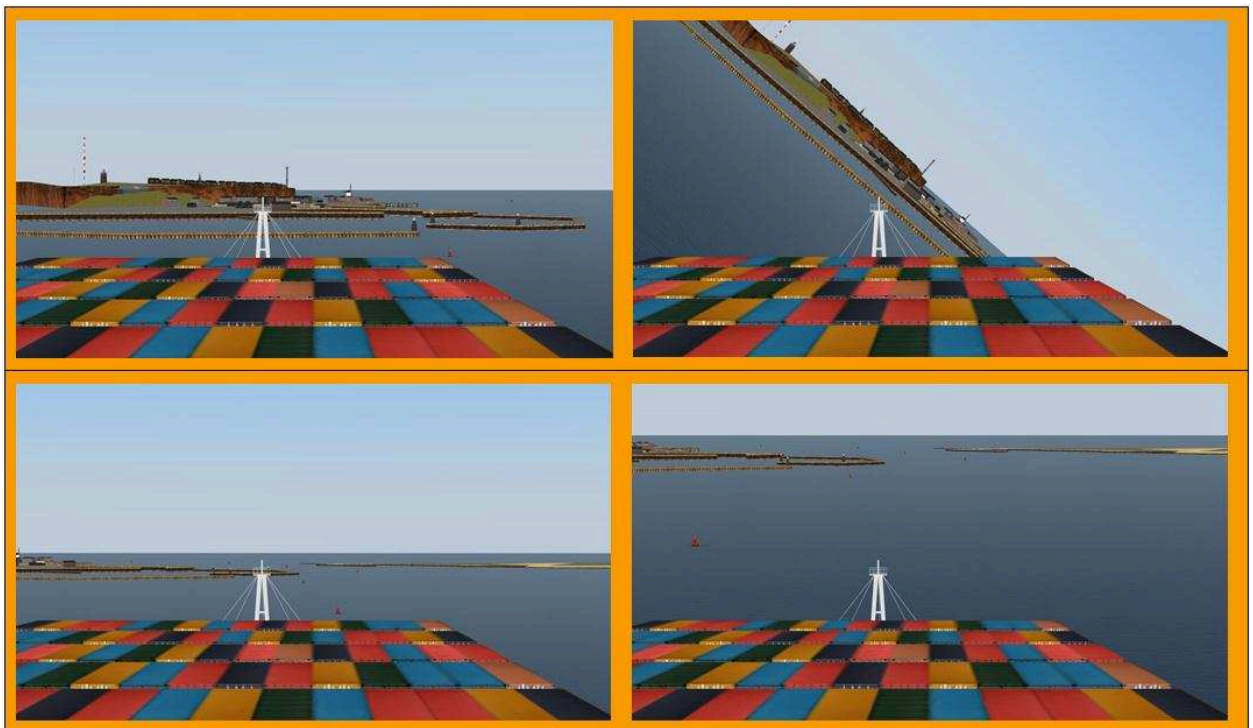


Bild 1: *Überschreiben fahrdynamischer Werte bei laufender Simulation, im Beispiel Trimm- und Rollwinkel*

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. Die in der letzten Periode angesprochenen Plug-Ins für den Seeschiff-Schiffsführungssimulator in der BAW in Hamburg wurden weiter entwickelt. Die Möglichkeit der Berücksichtigung der momentanen Verblockung auf den Fahrzustand konnte umgesetzt und verifiziert werden. Der Eingriff in eine laufende Simulation über die Plug-In Funktion ist uneingeschränkt möglich und eröffnet die erforderlichen Möglichkeiten zur Anpassung der Fahrdynamik in Echt-Zeit, (Bild 1). Hierbei hat sich eine weitere Grenze für die Bearbeitung mit der derzeitigen Plug-In Schnittstelle herausgestellt, die ebenfalls in deren Implementierung durch den Hersteller begründet liegt. Über die Schnittstelle wird zusätzlichen, durch den Anwender erstellten Modellen und Prozessen die Möglichkeit verschafft, Kräfte und Momente mit einem Faktor zu belegen und additiv zu erhöhen oder erniedrigen. Dies greift dabei nur für die ermittelte Gesamtkraft einer Komponente, nicht aber für deren Anteile. Im Juli 2012 konnte ein einvernehmliches Vorgehen mit dem Hersteller zur Entwicklung einer verbesserten Schnittstelle vereinbart werden. Im weiteren wurde neben Spezifikation der Anforderungen an diese erweiterte Plug-In Schnittstelle ein hauseigenes Tool, der Plug-In Manager, (Bild 2), entwickelt und realisiert, das später gemeinsam mit den Plug-Ins an die Betreiber ausgehändigt werden wird und mit dessen Hilfe die Installation der Plug-Ins und die Entscheidung über deren Einsatz im Verlauf der Untersuchungen im Auftrag der WSV unkompliziert gehandhabt werden kann. Die anschließende De-Installation kann so erfolgen, dass jegliche Änderung am Simulator spurenfrei rückgängig gemacht wird und sichergestellt ist, dass der Simulator in denselben Zustand zurück versetzt werden kann, in dem er sich vor der Bearbeitung des WSV-Auftrags befand.

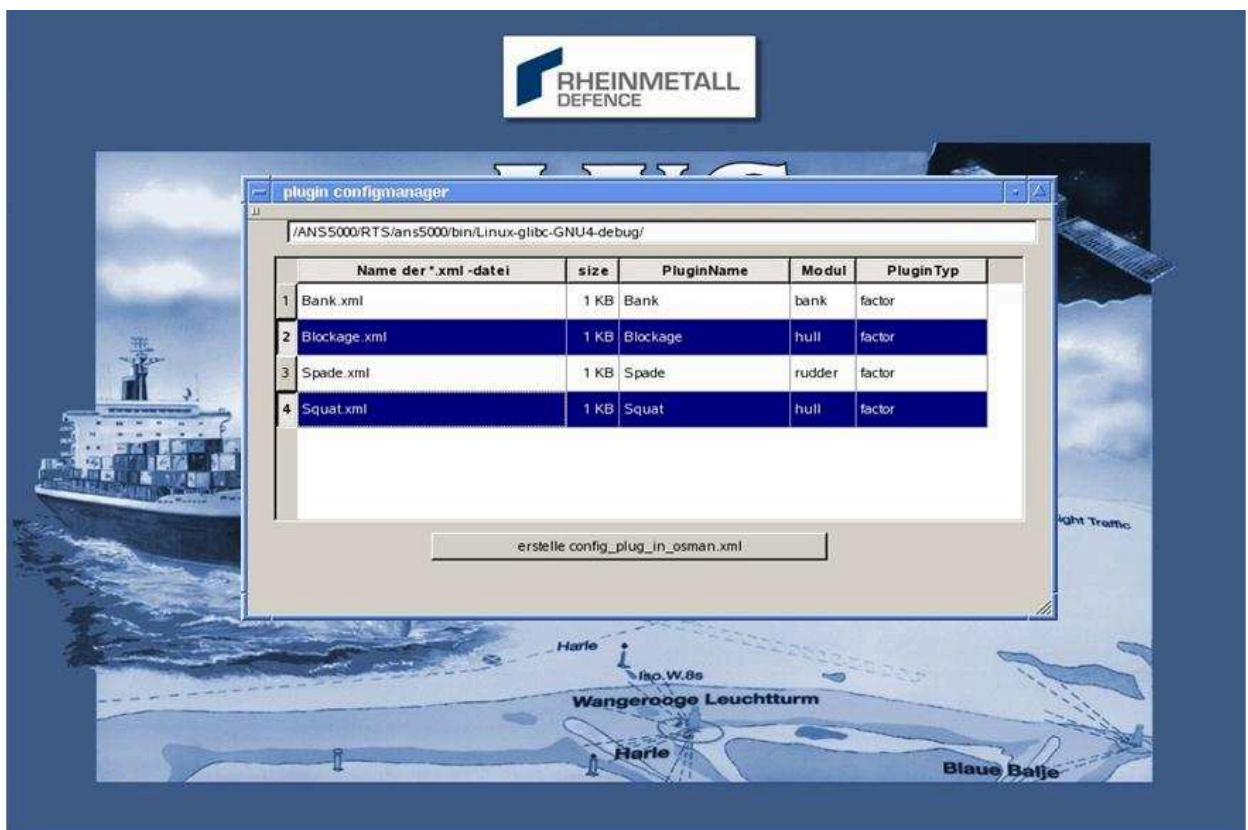
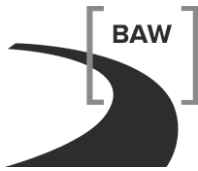


Bild 2: *Bedienerfenster (GUI) mit Auswahloptionen des Plug-In Manager vor Beginn einer Simulation*

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In 2013 steht die Verfügbarkeit einer Plug-In Schnittstelle, die die benötigte Funktionalität in vollem Umfang aufweist im Vordergrund. Denn die Möglichkeit kurzfristig vollständig reversible Änderungen



an der Simulatoranlage eines Auftragnehmers der WSV vornehmen zu können ist eine grundlegende Voraussetzung für das Bearbeitungskonzept und deren Umsetzung des Forschungsvorhabens.

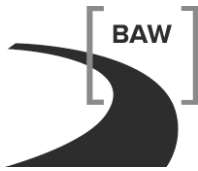
Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2015.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

Carl-Uwe Böttner: „Schiffsführungssimulation der Revierfahrt“ Vortrag und Kurzfassung im Tagungsband, FuE Kolloquium der BAW, 21. September 2012, Hamburg



Numerische Berechnung der Schiffshydrodynamik und Manövrierfähigkeit im Flachwasser (SHD-F)

Netzplan-Nr.: A39550270133

Projektleiter: Dr.-Ing. C.-U. Böttner, Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

E-Mail: carl-uwe.boettner@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Fragestellung besteht aus der Bestimmung der Strömungsverhältnisse und Transportvorgänge in der Umgebung des Schiffs und in der Wasserstraße. Während in den vergangenen Jahrzehnten eine rege Forschungs- und Entwicklungstätigkeit bei der Schiffsumströmung zu verzeichnen ist, wurde der Aspekt des Flachwassereinflusses und der geringen Kieffreiheit bisher wenig beachtet. Das liegt darin begründet, dass dieser Fahrzustand in der Dienstzeit eines Schiffes nur zu einem geringen Teil vorkommt und daher für die Schiffseigner eine untergeordnete Rolle spielt, aber auch darin, dass die mathematisch numerische Modellierung noch erheblich anspruchsvoller ist, wenn Verblockungseffekte und sich vereinigende Grenzschichten zu berücksichtigen sind. Für die WSV ist hingegen die Revierfahrt unter Flachwassereinfluss der einzig relevante Fahrzustand. In der jüngsten Vergangenheit haben Rechnerleistung und Speicherkapazitäten einen Stand erreicht, der es ermöglicht, Kräfte, Momente und die auftretende Fahrdynamik mathematisch numerisch vorherzusagen und zu beschreiben. Damit werden dringend benötigte Daten und Werte für die Bemessung und die wirtschaftliche Ausnutzung der Seeschiffahrtsstraßen 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 Fremdleistungsnehmern als Vergabeleistung und durch die Projektmitarbeiter in der DH betrieben.

3 Ergebnisse

Im Berichtszeitraum wurden numerische Berechnungen der Schiffsumströmung bei Fahrt im Kanal, nahe einer Böschung und Passage an einem Festlieger durchgeführt. Wesentliche Schwerpunkte sind einmal die Validierung des derzeitigen Modellsetups anhand von Squat-Messwerten aus dem physikalischen Modellversuch. Das Ziel dabei ist, in Zukunft numerische Squat Vorhersagen mit bekanntem Vertrauensintervall für weitere Schiffe durchführen zu können. Weiterer Schwerpunkt war der Einsatz und die Validierung eines neuen numerischen Ansatzes in dem Softwarepaket StarCCM+ von CD

adapco. Hierbei handelt es sich um die Technik der Overset-Meshes. Darunter ist ein weiteres Gitter, das körperfest um einen beweglichen Körper erstellt wurde, zu verstehen, das sich frei im Rechenraum des Hintergrundgitters bewegen kann. Die Vorteile für Körper mit 6 Freiheitsgraden die sich in einer Dichtegrenze bewegen ist offensichtlich. Erster Test- und Anwendungsfall ist die Passage von Schiffen. In Bild 2 oben ist die Passage als numerische Simulation zu erkennen, im unteren Teilbild sieht man, wie sich die Strömungsverhältnisse um den Festlieger (links) durch die Passage verändern. Es ist zu erkennen, dass die induzierten Strömungsgeschwindigkeiten bei einer so engen Passage zeitweise annähernd die Größenordnung derer des fahrenden Schiffs annehmen.



Bild 1: *Oberflächendeformation bei wandnaher Fahrt in einem Kanal mit Böschung, symbolisch dargestellt sind die Positionen der Kontrollpegel, mit denen unter anderem die Rechenergebnisse mit dem physikalischen Modellversuch verglichen werden.*

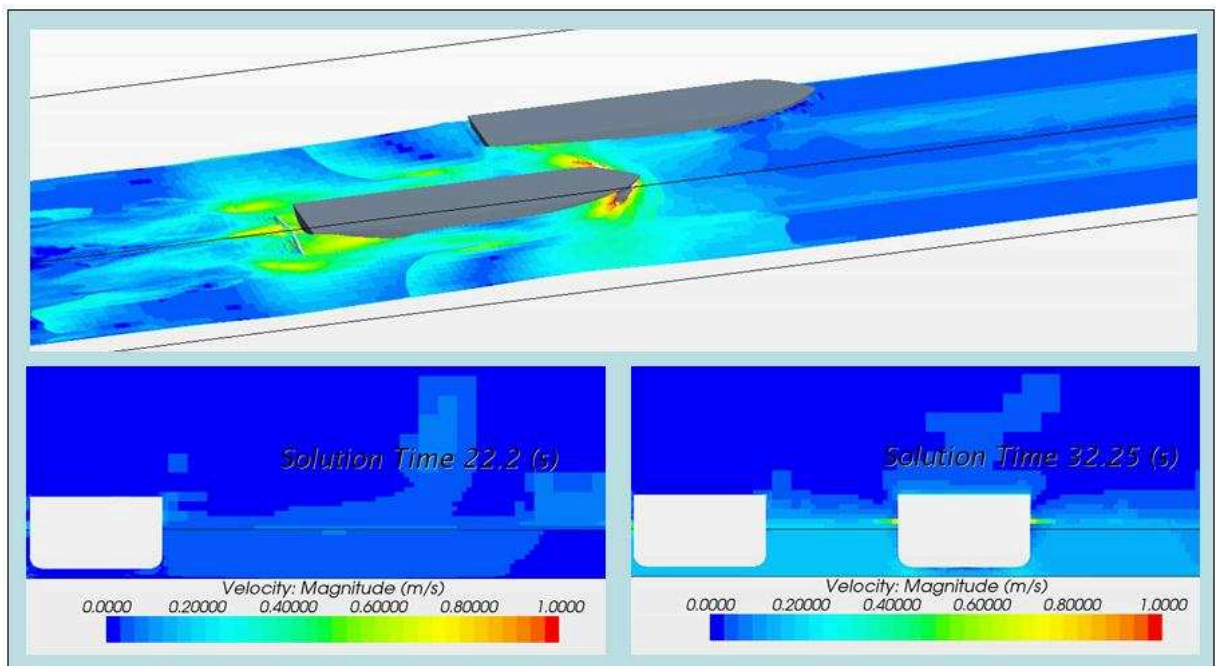


Bild 2: *RANSE-Simulation der Rumpfumströmung während der Passage eines Schiffes, dargestellt der Schnitt durch den Hauptspant des Festliegers im Vergleich mit und ohne Passage.*

An die Technische Universität Berlin wurde die Messung des Rumpf-Längswiderstands bei unterschiedlichem Verblockungsgrad in der Wasserstraße vergeben. Solche Werte lassen sich mit vertretbarem Aufwand nur in einem Umlauftank bestimmen. Der große Umlauftank der ehemaligen VWS in Berlin bietet hierfür mit einer Messstrecke der Dimensionen 11 m Länge, 5 m Breite und 3 m Tiefe ideale Voraussetzungen. Es wurde ein in der Höhe verstellbarer Zwischenboden eingezogen, an dem die Seitenwände befestigt werden, die auf dem Zwischenboden in verschiedenen Positionen arretiert werden können, somit ergibt sich die Möglichkeit, schnell den Wasserstand und die Verblockung einzustellen (Bild 3).

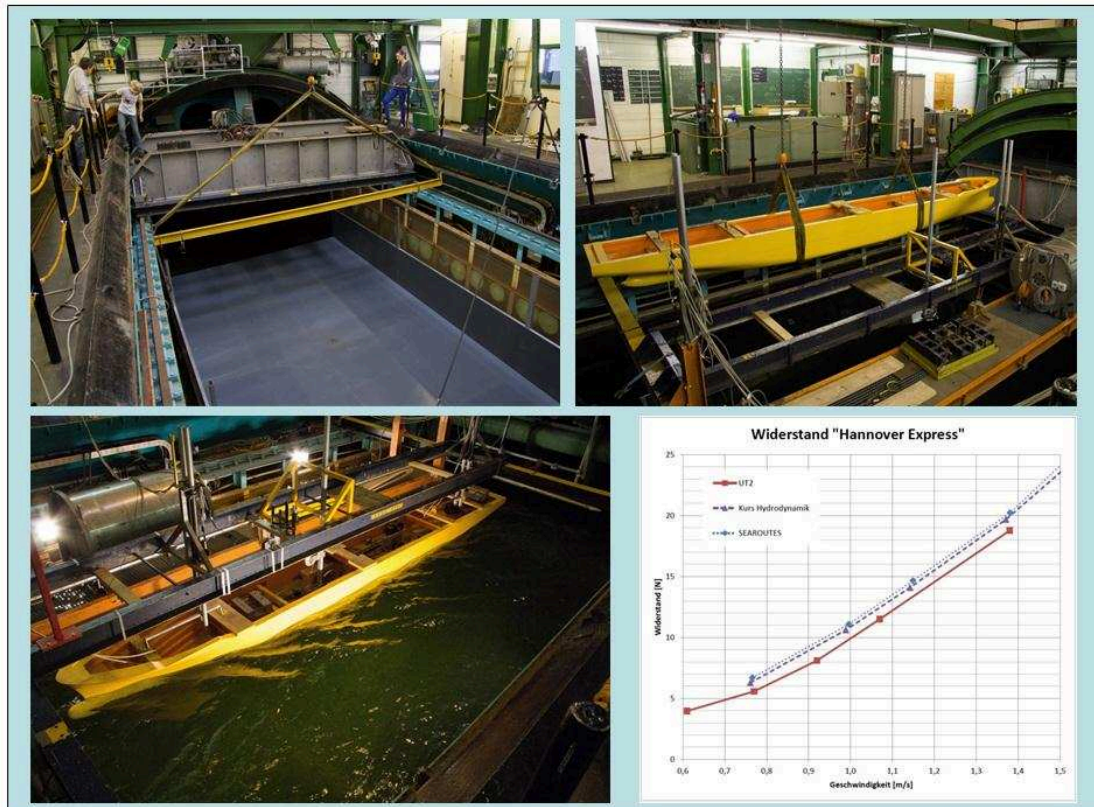


Bild 3: Messungen im Umlauftank und exemplarische Messergebnisse des Längswiderstands.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In der numerischen Berechnung der auftretenden Kräfte auf den Rumpf in engem Fahrwasser wird auch in 2013 der Bearbeitungsschwerpunkt liegen. Hierfür werden die Möglichkeiten und Grenzen der Overset-Mesh-Methode ausgelotet. Anwendungsfälle sind Begegnungsverkehr und weiterhin die dynamische Schwimmelage zur Squat-Vorhersage sowie Bank-Kräfte und -Momente. Die Ergebnisse der Messungen am Umlauftank in Berlin eignen sich auch als numerische Testfälle. Freimanövrierende Versuchsfahrten sind frühestens im Sommer 2013 vorgesehen. Bis dahin sind die entsprechenden Versuchseinrichtungen der Halle 1 durch andere Forschungsaufgaben belegt. Das Vorhaben liegt in der ursprünglichen Zeitplanung des Projektantrags. Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2015.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

Carl-Uwe Böttner: „Schiffshydrodynamik bei der Revierfahrt“ Vortrag jährliche Sitzung des Fachausschuss Hydrodynamik der STG, 28. September 2012, Hamburg

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 Bühnen sowie Deckwerken an den Seeschiffahrtsstraßen aufgrund schiffserzeugter Belastungen wurden in der letzten Dekade verstärkt in der Außenweser sowie in der Unterelbe festgestellt. Für eine Abschätzung der schiffserzeugten, langperiodischen hydrodynamischen Belastung der Deckschichten als Basis für die Ermittlung der erforderlichen Steingrößen / -gewichte konnten nur vorhandene theoretische, fachlich nicht exakt zutreffende und nur bedingt gültige Ansätze verwendet werden (BAW, 2010). Hoch instationäre und turbulente hydrodynamische - zudem in Tideästuaren wasserstandsabhängige - schiffserzeugte Belastungen führen zu komplexen Untersuchungsaufgaben mit einer hohen Zahl von zu erfassenden und physikalisch zu beschreibenden hydrodynamischen Parametern, verteilt über verschiedene zu bemessende Abschnitte von Leitdämmen und Bühnen einschließlich deren Anbindung an die Ufersicherungen.

Durch die Kooperation mit universitären Einrichtungen wie dem Leichtweiß-Institut für Wasserbau (LWI) der TU Braunschweig sowie dem Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft (IWW) der RWTH Aachen werden wichtige Impulse für - über dieses Projekt hinausgehende - weitere Grundlagenforschungen erwartet, so dass dadurch ein zusätzlicher Mehrwert auf diesem WSV-relevanten Forschungsgebiet durch ebendiese Universitätsinstitute geschaffen wird.

1.2 Bedeutung für die WSV

Aufgrund der weiterhin zunehmenden Größenentwicklung der Containerschiffahrt mit der Inbetriebnahme von 14.000 TEU-Containerschiffen in 2010 und 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 Unterelbe 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 Bühnen.
- 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 mit LWI und IWW sind umfangreiche methodenübergreifende Untersuchungen an Seeschiffahrtsstraßen zur langperiodischen schiffserzeugten Belastungen im Nahbereich von Leitdämmen und Buhnen wie u.a. das Prüfen von vorhandenen empirisch-analytischen Ansätzen, klein- und ggf. großmaßstäbliche 2D und 3D-Untersuchungen, hydrodynamisch-numerische Simulation, Monitoring in der Natur sowie die Erarbeitung von probabilistischen Bemessungsansätzen parallel zur deterministischen Bemessung vorgesehen. Des Weiteren sind hinsichtlich einer ganzheitlichen Betrachtung der Aufgabenstellung enge projektübergreifende Kontakte mit dem FuE-Projekt A39550170270 der BAW aus dem Fachgebiet Geotechnik vorgesehen.

3 Ergebnisse

Nach der in 2012 abgeschlossenen Schadensanalyse (Arbeitspaket AP1) liegen die Berichte der Prozess- und Wissensstandsanalyse (AP2; IWW, 2012) sowie der Parametrisierung von gemessenen Schiffswellen in Modell und Natur (AP3; LWI, 2012) vor.

Weitergehende Recherchen von BAW (BAW, 2010) und IWW (AP2; IWW, 2012) 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 besteht.

Beispielhaft für den erforderlichen Untersuchungsumfang unter Berücksichtigung verschiedener Profile von Strombauwerken der WSV (u.a. Buhnen und Leitdämme) ist der Ablaufplan für die physikalischen Modellversuche aus der Projektskizze für das AP4a des IWW (IWW, 2012) dargestellt (Bild 1).

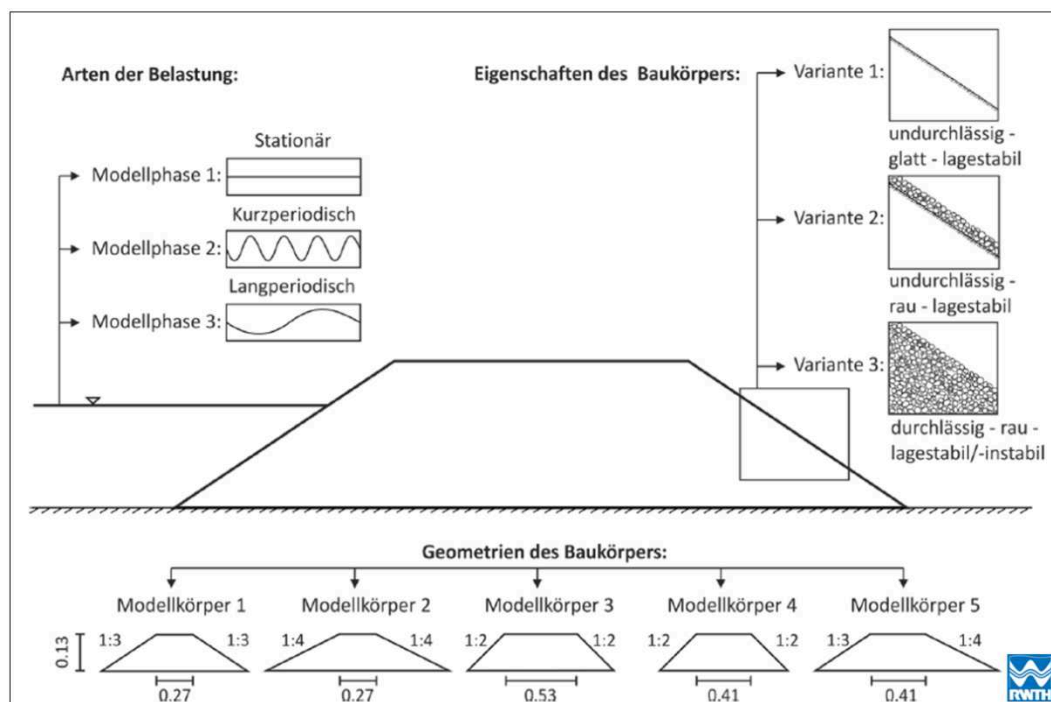


Bild 1: Varianten der physikalischen Modellversuche des AP4a (aus: IWW, 2012)

Mit dem Ziel, die Besonderheiten der langperiodischen schiffserzeugten Belastung mittels physikalischer Parameter zu beschreiben, werden im physikalischen Modell der Einfluss der Dynamik der langperiodischen Welle, der Geometrie des Bauwerkskörpers sowie der Porosität und Rauheit durch drei bzw. 5 Varianten untersucht. Anhand der Stabilitätsuntersuchungen bei der jeweiligen Variante 3 werden die Grenzbedingungen entsprechender Deckschichten ermittelt. Anhand der kleinmaßstäblichen Versuche werden die dann noch erforderlichen großmaßstäblichen Untersuchungen herausgearbeitet.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die AP4 (Kleinmaßstäbliche Untersuchungen) und AP5 (Numerische Simulation) wurden auf der Basis von Projektskizzen an die Institute IWW bzw. LWI vergeben. Die bisher geplanten Arbeitspakete werden voraussichtlich einen Bearbeitungszeitraum von rund 5 bis 6 Jahren in Kooperation mit den Küstenämtern der WSV, den Universitätsinstituten sowie 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.

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2016.

5 Literatur

- BAW (2010): Bemessung der Strombauwerke in der Außenweser unter Berücksichtigung von Schiffswellenbelastungen. Gutachten BAW-Nr. A39550210120, Hamburg (*unveröffentlicht*)
- BAW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP1 – Schadensanalyse. BAW-Nr. A39550270141, Hamburg (*unveröffentlicht*)
- HPA (2011): BAW-FuE-Projekt „Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten an Seeschiffahrtsstraßen“ - Schadensfälle an Hamburger Stacks, Hamburg (*unveröffentlicht*)
- IWW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP2 – Wissenstandsanalyse der an der Wellen-Strombauwerk-Interaktion beteiligten Belastungsprozesse. RWTH Aachen (*unveröffentlicht*)
- IWW (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP4 – Kleinmaßstäbliche Untersuchungen zur Erfassung der maßgebenden Prozesse und zur hydraulischen Stabilität (Projektskizze), RWTH Aachen (*unveröffentlicht*)
- LWI (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen, AP3 – Bestimmung der bemessungsrelevanten Parameter schiffserzeugter Wellen in SeeSchStr (Parametrisierung der Schiffswellen. TU Braunschweig (*unveröffentlicht*)

6 Veröffentlichungen

- Uliczka, K. (2012): Schiffserzeugte langperiodische Belastung zur Bemessung der Deckschichten von Strombauwerken an Seeschiffahrtsstraßen – FuE-Kooperation von LWI (TU BS) / IWW (RWTH) / HPA / BAW. BAW-Kolloquium 21.09.2012, Hamburg

Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen

Netzplan-Nr.: A39550270142

Projektleiter: Dr.-Ing. K. Uliczka, 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 Ästuare nach den vergangenen Ausbaumaßnahmen der Fahrrinnen stellte sich vermehrt in den letzten 10 Jahren die Frage nach dem Anteil von Schiffspassagen der immer größer werdenden Fahrzeuge am residuellen Sedimenttransport.

Nach einer ersten 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 werden mit entsprechendem Vorlauf die betroffenen Ämter der WSV sowie die zuständigen Lotsenbrüderschaften in das Vorhaben eingebunden.

1.3 Untersuchungsziel

Die wesentlichen, abschnittsunabhängigen Ziele der Untersuchungen für die Seeschiffahrtsstraßen sind:

- Grundsätzliche Erfassung des schiffserzeugten Sedimenttransports (SeST) mit u.a. instationärer schiffserzeugter Wasserspiegeländerung, instationärer schiffserzeugter Strömung in Betrag, Richtung und Verteilung, Turbulenzmaß und -ausbreitung, Suspensionskonzentration und deren vertikale/horizontale Verteilung, Sedimentologie des Gewässerbetts, lokale Sohl- und Böschungsänderungen sowie relevante Daten der Schiffe und deren Passagen.
- Differenzierung des SeST, räumlich und prozessorientiert: Im Nahfeld des Schiffs mit dessen Anteilen, bewirkt durch die Verdrängungsströmung, durch strömungsinduzierte Druckänderung, durch den Propellerstrahl und/oder Nachstrom. Im Fernfeld mit den Anteilen aus Verdrängungsströmung, welleninduzierter Orbitalströmung. Im ufernahen Bereich mit Anteilen aus Verdrängungsströmung, welleninduzierter Orbitalströmung, welleninduzierter Druckänderung/Turbulenz und Wellenumformungsprozessen.
- Entwicklung empirisch-analytischer Ansätze zur Abschätzung des SeST in Seeschiffahrtsstraßen für das Nahfeld, das Fernfeld sowie die Uferzone sowie
- Ermittlung des Anteils des SeST am Gesamttransport in einem Tideästuar.

2 Untersuchungsmethoden

Aufgrund der Abhängigkeit der tidebedingten und schiffserzeugten physikalischen Prozesse, die den SeST in einer Seeschiffahrtsstraße beeinflussen, können nur Messungen in der Natur über die Wirkzusammenhänge Aufschluss geben. Zur ganzheitlichen Betrachtung sind SeST-Messungen im Nah- und Fernfeld sowie in der Uferzone vorgesehen. Dazu sind neben einer vertieften Prozess- und Wissensstandsanalyse (AP1) verschiedenste Arbeitspakete erforderlich, die u.a. unter den folgenden Aspekten abgearbeitet werden.

Im AP2 wurden in 2012 Messungen, u.a. als Erprobung von Verfahren, unter kontrollierten Bedingungen bei geringem „Grundrauschen“ in der Seeschiffahrtsstraße Nordostsee-Kanal (NOK) vorgenommen, um dann mit den geprüften Messverfahren in einem weiteren Schritt weitere Messkampagnen unter Tidebedingungen fortzuführen.

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 waren bei dem Messkampagne am NOK in 2012 zu erproben und auf ihre Einsatztauglichkeit für die Messaufgabe zu überprüfen.

Die Messergebnisse der Hydrodynamik sowie des bereichsweisen schiffserzeugten Sedimenttransports sind prozessorientiert zu analysieren, als empirisch/analytische Ansätze zu formulieren und hinsichtlich des Genauigkeitsmaßes sowie der Gültigkeitsgrenzen zu betrachten.

Die in der Natur erfassten hydrodynamischen Prozesse bei der Umströmung eines Schiffs bei Revierfahrt werden zudem als weitere Validierungsdaten in dem laufenden FuE-Projekt Schiffshydrodynamik in Flachwasser SHD-F (BAW-Nr. A39550270133) verwendet.

3 Ergebnisse

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 wurden u.a. umfangreiche synoptische Feldmessungen im Nah- und Fernfeld von Schiffspassagen zum Prozessverständnis sowie zur Validierung von numerischen Verfahren (FWU, 2011).

Um einen Einblick in die Vielfalt der Verhältnisse in der Wassersäule nach der Passage eines Schiffs zu erhalten, waren im AP2 stichprobenartig über einen längeren Zeitraum zeitlich und räumlich hochauflösende (Sonar-) Profilmessungen zur Erfassung der akustischen Signatur des Nachstroms im Nahfeld eines passierenden Seeschiffs sowohl in der Tideelbe bei Wedel als auch im Nordostsee-Kanal vorgenommen worden (HCU, 2011; HCU, 2012). Die Ergebnisse der akustischen Signatur mittels Sonarsystems INNOMAR SES 2000 lassen vermuten, dass zwar momentane schiffserzeugte Änderungen der Sohlstrukturen erfasst werden, die Rückstreusignale in der Wassersäule vermutlich eher auf Turbulenzballen im Nachstrom zurückzuführen sind. .

Die im Rahmen des AP2 vorgenommene Messkampagne am NOK im September 2012, die von der BAW mit dem Partner AquaVision, Utrecht, NL und der Unterstützung des ABz. Hochdonn des WSA Brunsbüttel erfolgte, zeigte nach ersten Auswertungen den Zusammenhang von schiffserzeugten Strömungsvorgängen und entsprechend aufgewirbelten Sohlsedimenten auf der Basis von ADCP-

SSC-Analysen (Suspended Sediment Concentration) sowie stationären und mobilen Trübungs- und Strömungsmessungen.

Die physikalischen Prozesse und deren zeitlicher Ablauf wurden beispielhaft anhand von Passagen zweier Seeschiffe im NOK mit deren schiffserzeugten Wasserspiegeländerungen und Strömungen sowie den zeitgleichen Trübungsänderungen an der Gewässersohle in der Mitte der Fahrrinne dargestellt (Grafik nach Kondziella et al., 2012).

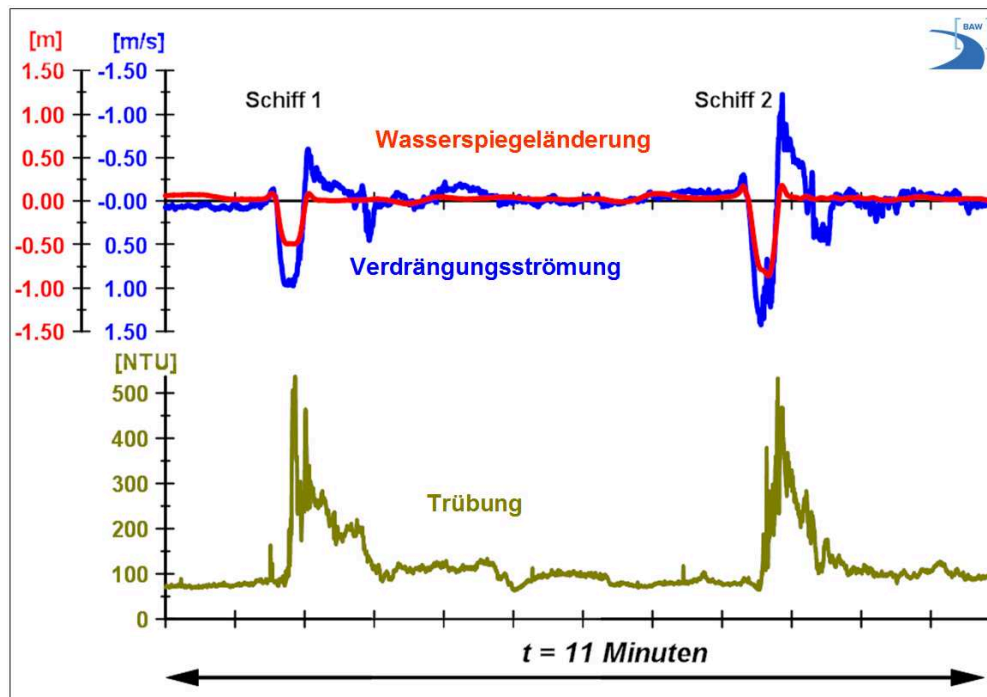


Bild 1: Beispiel einer Passage zweier Seeschiffe in kurzer zeitlicher Abfolge mit Auswirkungen auf die Trübung an der Gewässersohle in der der Fahrrinne (nach Kondziella et al. 2012).

Die Darstellung bestätigt die bisherigen Annahmen der BAW, dass schon die schiffserzeugte Verdrängungsströmung und nicht erst der Propellerstrahl für deutliche Trübungszunahmen und damit zu Sedimenttransportprozessen beiträgt.

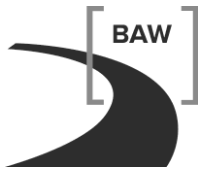
4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die umfangreichen Messdaten der BAW und des Partners AquaVision von annähernd 40 Einzelschiffs- und Konvoipassagen aus der Kampagne am NOK vom September 2012 werden in 2013 ff. zusammengeführt und weitergehend analysiert sowie hinsichtlich möglicher Rückschlüsse auf die vorgesehenen Messkampagnen in der Tideelbe bewertet. Darüber hinaus ist die Vorbereitung der weiteren AP's der FuE-Projekts vorgesehen.

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2016.

5 Literatur

- AquaVision (2012): Suspended sediment measurements in the Nord-Ostsee-Kanal. AquaVision BV, Utrecht, The Netherlands (in Englisch; *unveröffentlicht*)
- FWU (2011): Wissensstandsanalyse zum schiffserzeugten Sedimenttransport (SeST), Auftrag: WBL 250 D, Universität Siegen (*unveröffentlicht*)
- HCU (2011): Akustische Signatur des Nachstroms im Nahfeld passierender Seeschiffe auf der Unterelbe. Northern Institute of Advanced Hydrographics / HafenCity Universität Hamburg (*unveröffentlicht*)



HCU (2012): Erfassung des Gewässerbetts und von Sedimenten im Nordostseekanal (NOK) mit hydroakustischen Methoden. Northern Institute of Advanced Hydrographics / HafenCity Universität Hamburg (*unveröffentlicht*)

6 Veröffentlichungen

Kondziella, B., Böder, V., Prokoph, A., Sauer, A. (2012): Neue Verfahren zur Erfassung von schiffserzeugtem Sedimenttransport in NOK und Elbe. Tagungsband 4. Symposium Geoinformationen für die Küstenzone, HCU Hamburg

KLIWAS – K3 (<http://www.kliwas.de/>)

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

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

Netzplan-Nr.: A39550310162

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

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

Ostsee:

Zur Validierung der Wasserstände des Ostseemodells wurden Pegeldata des Jahres 2011 aufbereitet, darunter auch Daten ausländischer Pegelstationen. Der Vergleich der Wasserstände von Modell und Messungen zeigt flächendeckend eine gute Übereinstimmung. Sowohl windinduzierte Hoch- und Niedrigwasserereignisse als auch das in der westlichen Ostsee noch messbare Tidesignal werden im Modell naturähnlich abgebildet. Abweichungen können damit erklärt werden, dass die eingehenden

meteorologischen Randwerte an der Wasseroberfläche aus Modellvorhersagen stammen, also bereits eine Abweichung zum wirklich gelaufenen Wettergeschehen besitzen. Der am Pegel Sassnitz offensichtlich noch vorhandene Niveauunterschied erklärt sich aus der Tatsache, dass der Wassermassenaufbau im Modell nicht durch aktuelle Temperatur- und Salzgehaltsdaten initialisiert wurde, und daher die Dichte in den tiefen Ostseebecken zu gering ist.

Ems, Jade-Weser, Elbe:

Für die drei Ästuare 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.

In der Unterems bestehen bereits heute Probleme bezüglich hoher Salzgehalte und hohem Schwebstoffeintrag. Klimabedingte Veränderungen der Hydrodynamik können diese Betroffenheit verstärken, wie die durchgeführten Sensitivitätsstudien zu Meeresspiegelanstieg und lang anhaltenden Niedrigwasserabflüssen gezeigt haben.

Eine nachhaltige Verminderung des seeseitigen Schwebstoffeintrags in die Unterems könnte durch eine Dämpfung der Tidedynamik in der Unterems erreicht werden. Der Bau einer Sohlschwelle am Emssperrwerk mit einer Oberkante von NHN -1,5 m hat diese Wirkung, wie Untersuchungen des Aktionsprogramms Ems zeigen. Dadurch wird die Lage der Brackwasserzone stromab verschoben und der Nettoschwebstofftransport in die Unterems deutlich vermindert. Diese positive Wirkung bleibt auch unter klimabedingten Veränderungen erhalten. Bei einem steigenden Meeresspiegel ist es möglich, eine Sohlschwelle durch eine Erhöhung anzupassen. Somit ist eine Sohlschwelle eine Anpassungsoption für zukünftige Verhältnisse.

Die Elbe nimmt in Bezug auf die Schadstoffbelastung des Sediments eine besondere Rolle unter den deutschen Ästuaren ein. Aufgrund der langen Fließstrecke durch zum Teil stark mit Schadstoffen belastete Einzugsgebiete weist die Sedimentfracht der Elbe bei Geesthacht hohe Schadstoffbelastungen auf. Die Transportdynamik wird stark von Extremereignissen im Einzugsgebiet geprägt.

Die Modellierung von Transportprozessen belasteter Sedimente kann wichtige Aufschlüsse über die Dynamik dieser Prozesse und deren Abhängigkeit von den hydrodynamischen Gegebenheiten liefern. In einer Pilotstudie werden mit dem Modell des Elbeästuars der BAW in Kooperation mit der BfG erstmals Untersuchungen mit einem dreidimensionalen hydrodynamischen Transportmodell durchgeführt.

Der verwendete Modellansatz beschränkt sich zunächst auf Schadstoffe, die überwiegend an Sedimenten adsorbiert transportiert werden, wie zum Beispiel das Schwermetall Cadmium. Es wurde eine detailliertere Anfangsverteilung der Belastung des Sediments mit Cadmium erstellt. Diese beruht auf 121 Messungen der BfG entlang der Tideelbe. Als generelle Tendenz ist eine Abnahme der Belastung hin zur Nordsee zu erkennen. Je weiter man sich der Deutschen Bucht nähert, desto geringer wird der Einfluss der von Oberstrom kommenden Sedimente und die Gesamtbelastung hängt verstärkt von den bereits vorhandenen Sedimenten mit einer in der Regel geringeren Belastung ab.

Der Anstieg des Meeresspiegels um 80 cm führt zu einer Erhöhung der Tideenergie und erhöhten Schwebstoffkonzentrationen in der Trübungszone. Dies führt zu einer niedrigeren Gesamtbelastung der Sedimente in der Wassersäule, da der Anteil der geringer belasteten Sedimente ansteigt und die Bedeutung der stark belasteten Sedimente, die mit dem Oberwasser eingetragen werden, abnimmt.

In den Sensitivitätsstudien zu Sturmfluten im Elbe-, Jade-Weser- und Ems-Ästuar wurden die Auswirkungen veränderter Randbedingungen wie Meeresspiegelanstieg, Oberwasserzufluss und Windver-

hältnisse untersucht. Auch wenn die zukünftigen Entwicklungen dieser Randbedingungen schwer vorherzusagen sind, haben die Sensitivitätsstudien gezeigt, dass im zukünftigen Klima wahrscheinlich mit höheren Sturmflutscheitelwasserständen gerechnet werden muss. Allein ein Anstieg des mittleren Meeresspiegels in der Nordsee wird zu höheren Sturmflutscheitelwasserständen führen. Verschiedene Anpassungsoptionen sind denkbar: Deicherhöhung auf vorhandener Linie, Anlage von Sturmflutentlastungspoldern, Sturmflutsperrwerk in der Mündung, Einengung des Mündungsbereichs. Insbesondere bei einem hohen Anstieg des mittleren Meeresspiegels könnte eine Deicherhöhung auf vorhandener Linie nicht in dem benötigten Maße möglich sein. Daher ist es sinnvoll auch andere Optionen in Betracht zu ziehen.

Für das Jade-Weser-Ästuar wird ein Sturmflutsperrwerk bei Weser-Kilometer 64 südlich der Hafenanlagen in Bremerhaven untersucht. Für diese Untersuchung ist die Sturmflut vom 1. November 2006 in Kombination mit einem Meeresspiegelanstieg von +80 cm gewählt worden.

Die Ergebnisse hängen stark vom Schließzeitpunkt des Sperrwerks ab (Bild 1). Wird das Sperrwerk bei einem Wasserstand von NHN +3,50 m geschlossen, entsteht eine Sunk- und Schwallwelle (rot). Wird das Sperrwerk während eines strömungsarmen Zeitpunkts (z.B. bei Kenterung) geschlossen, entsteht keine oder nur eine sehr kleine Sunk- und Schwallwelle.

Die Simulationen mit erhöhtem Meeresspiegel verdeutlichen, dass ein Sturmflutsperrwerk ein wirksamer Schutz wäre. Hinter dem Sperrwerk spielt der Meeresspiegelanstieg bei Sturmflut keine entscheidende Rolle mehr. Die Scheitelwasserstände werden deutlich gesenkt (Bild 1).

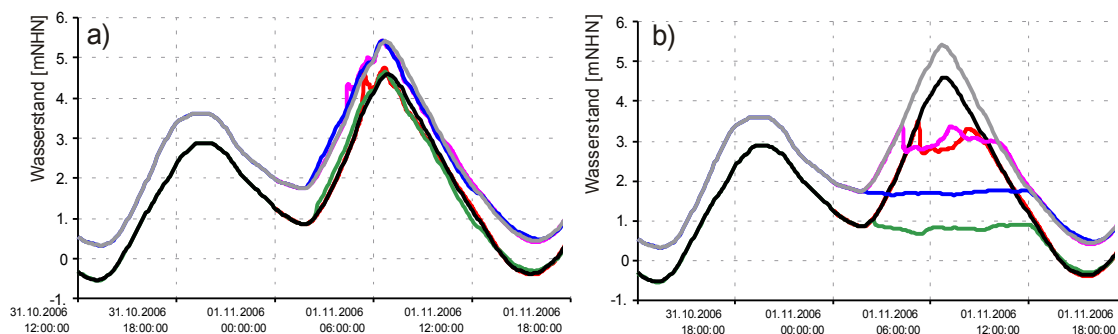


Bild 1: Modellrechnung der Sturmflut am 1. Nov. 2006: schwarz: ohne Sperrwerk, grau: ohne Sperrwerk +80 cm, rot: mit Sperrwerk (Schließung bei NHN +3,50 m), grün: mit Sperrwerk (Schließung bei Kenterung), magenta: wie rot aber +80 cm, blau: wie grün aber +80 cm, a) Wasserstand direkt vor dem Sperrwerk (stromab), b) Wasserstand direkt hinter dem Sperrwerk (stromauf)

Ein Sturmflutsperrwerk im Mündungsbereich der Weser ist eine Anpassungsoption mit Vor- und Nachteilen. Die Studie hat gezeigt, dass das Sperrwerk das Hinterland effektiv vor erhöhten Sturmflutscheitelwasserständen, die durch einen Meeresspiegelanstieg verursacht werden, schützen würde. In ungeschützten Bereichen vor dem Sperrwerk können unter Umständen erhöhte Sturmflutscheitelwasserstände auftreten.

Zur Reduzierung der Sturmflutscheitelwasserstände in der Elbe sind wasserbauliche Maßnahmen im Mündungsbereich der Elbe für die Sturmflut vom 1. November 2006 mit und ohne Meeresspiegelanstieg von +80 cm untersucht worden. Als Maßnahmen werden vier Einengungsvarianten des Mündungsbereichs betrachtet, zwei linienförmige und zwei flächenhafte Bauwerke. Die beiden linienförmigen Bauwerke verlaufen vom Hafen Neufeld entlang des Hafenfahrwassers und anschließend parallel zum Neufelder Sand. Sie haben eine Höhe von NHN +10 m. Die Bauwerke unterscheiden sich in ihrer Länge. Das längere quert die Medemrinne. Das kürzere endet vor der Medemrinne. Für die zwei flächenhaften Bauwerke werden die Sandbänke Gelbsand und Großer Vogelsand und das dazwischen liegende Lüchterloch auf NHN +1 m bzw. auf NHN +10 m angehoben. Das auf NHN +1 m

angehobene Bauwerk wird während Sturmfluten überflutet, das auf NHN +10 m angehobene wird zu keinem Zeitpunkt überflutet.

Diese Studie hat gezeigt, dass Maßnahmen, die weiter im Ästuar liegen und den Querschnitt stark einengen die Sturmflutscheitelwasserstände stärker dämpfen als weiter in der Nordsee gelegene Maßnahmen.

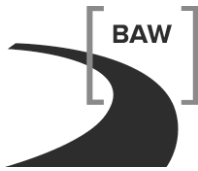
Dabei muss aber grundsätzlich beachtet werden, dass deutlich erhöhte Fließgeschwindigkeiten auftreten können. Denn neben den Wasserständen beeinflussen die Bauwerke auch die Strömungsgeschwindigkeiten. In der Nähe aller Bauwerke treten Änderungen der Flut- und Ebbstromgeschwindigkeit zwischen 0,4 m/s und 1,3 m/s auf. Treten diese Erhöhungen der Strömungsgeschwindigkeiten ufernah auf, kann dies zu Ufererosionen führen, die ggf. die Standsicherheit der Deiche gefährden könnten.

Der Meeresspiegelanstieg hat auf die bauwerksbedingten Änderungen der Strömungsgeschwindigkeiten kaum Einfluss. Im Gegensatz zu einem Sturmflutsperrwerk eliminiert die Einengung des Mündungsbereichs den Effekt des Meeresspiegelanstiegs auf die Sturmflutscheitelwasserstände nur teilweise.

4 Arbeitprogramm und Zeitplan

2012/13: Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und Modellierung der Wirksamkeit der Anpassungsmaßnahmen

Laufzeit des aktuellen Vorhabens von 2009 bis 2013.



KLIMZUG-Nord – Strategische Anpassungsansätze zum Klimawandel in der Metropolregion Hamburg (KLIMZUG-NORD: News)

Netzplan-Nr.: A39550370163

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

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

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 Schiffbarkeit, 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

Eine Anpassungsoption an einen erhöhten Meeresspiegel kann die Schaffung von zusätzlichem Flutraum entlang der Tideelbe sein. Diese Flächen könnten aus naturschutzfachlicher Sicht interessant sein, um ökologische Anpassungsmaßnahmen an den Klimawandel zu entwickeln. Ob dafür die Haseldorfer Binnenelbe eine Option sein könnte, soll in einer Untersuchung geprüft werden. Hierfür wurde die Haseldorfer Binnenelbe über eine etwa 50 m breite Schnittstelle an die Tideelbe im numerischen Modell angeschlossen (Bild 1), um die Auswirkungen auf den Wasserstand und den

Salzgehalt zu untersuchen. Der Anschluss der Haseldorfer Binnenelbe befindet sich ungefähr bei Elbe-km 650. Die Modelluntersuchungen wurden mit und ohne Meeresspiegelanstieg (+80 cm) sowie mit zwei unterschiedlichen Oberwasserzuflüssen ($Q = 350 \text{ m}^3/\text{s}$ und $Q = 710 \text{ m}^3/\text{s}$) durchgeführt. Es wurde ein Zeitraum von vier Wochen simuliert (07.07.2006 bis 04.08.2006) und 28 Tiden analysiert (20.07.2006 bis 03.08.2006).

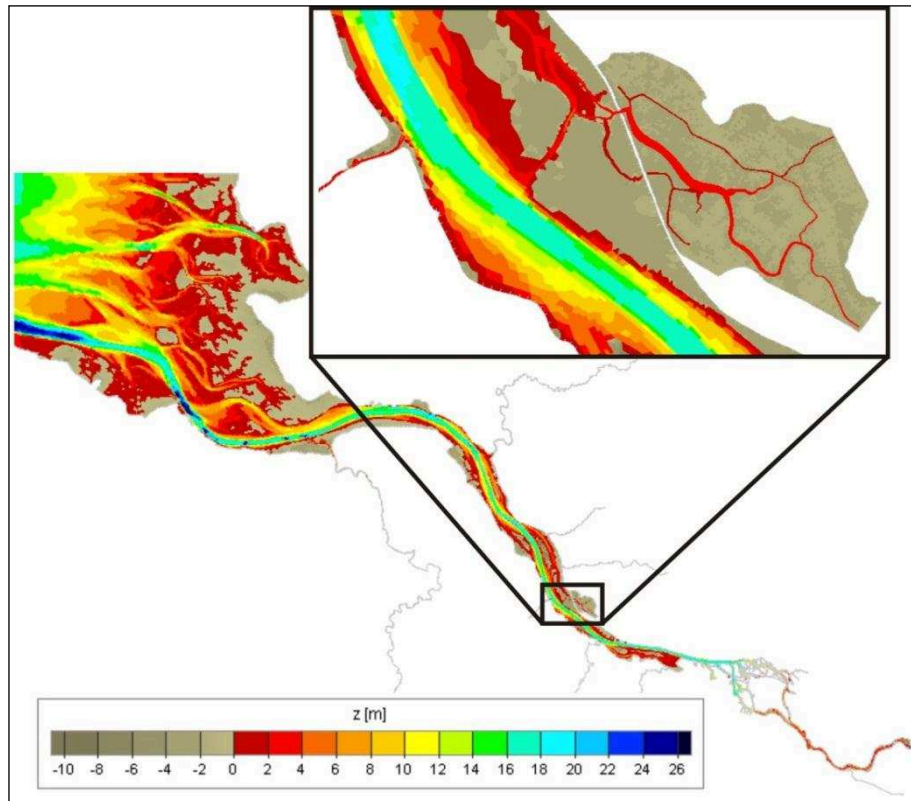


Bild 1: Modellgebiet der Elbe mit Erweiterung des Gebietes Haseldorfer Binnenelbe

Wasserstände, Strömungsgeschwindigkeiten und Salzgehalte in der Tidelbe ändern sich durch den Anschluss des Gebietes Haseldorfer Binnenelbe nur geringfügig. Sowohl mit als auch ohne Meeresspiegelanstieg sind die Änderungen des Wasserstandes im Vergleich zum gegenwärtigen Zustand geringer als 1 cm. Um Veränderungen des Wasserstandes und des Salzgehaltes, die sich aus dem Anstieg des Meeresspiegels bei Normaltiden ergeben, zu kompensieren, kann diese Anpassungsmaßnahme keinen nennenswerten Beitrag leisten. Für Aussagen auf Auswirkungen auf Sturmflutwasserstände sind ergänzende Untersuchungen erforderlich. Aus ökologischer Sicht, ist diese Maßnahme interessant. Durch den Anschluss der Haseldorfer Binnenelbe an das Tidegeschehen, könnte ein vielfältiger Lebensraum geschaffen werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012/13: Entwicklung von Anpassungsmaßnahmen und Modellierung der Wirksamkeit der Anpassungsmaßnahmen

Laufzeit des aktuellen Vorhabens von 2009 bis 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.

Verbesserung der Validität und der Prognosefähigkeit des morphodynamischen Verfahrens SediMorph

Netzplan-Nr.: A39550370178

Projektleiter: Dr.-Ing. H. Weilbeer, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,
Referat Ästuarsysteme II (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

Literaturrecherche

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.

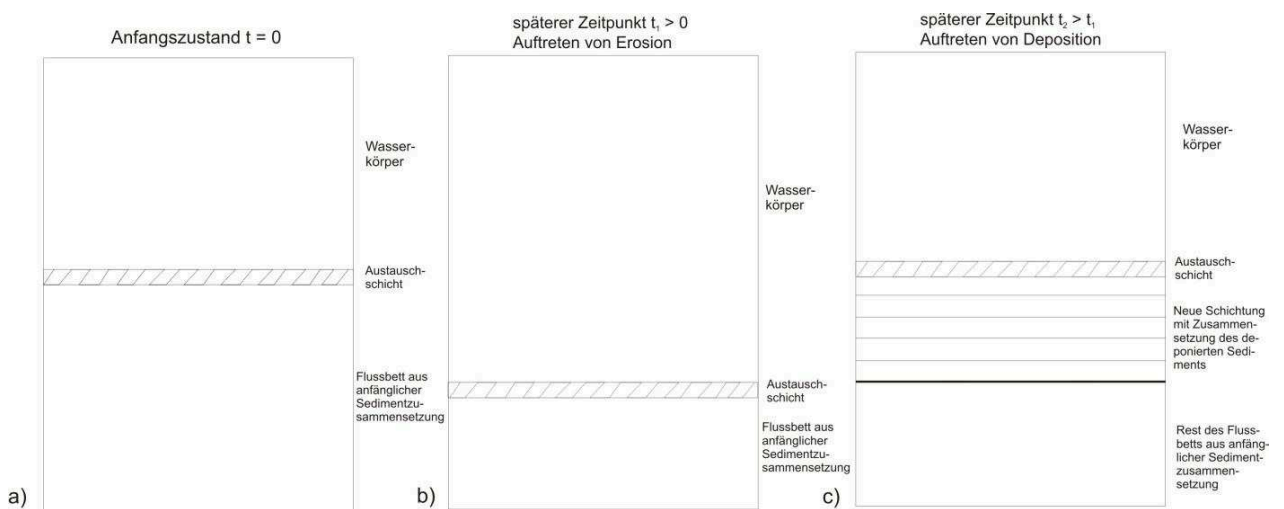


Bild 1: Zum Konzept der dreidimensionalen Speicherschichten in SediMorph

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.

Ebenfalls im Zusammenhang mit der Simulation von Bagger- und Verklappvorgängen wurde die Fähigkeit des Modellsystems ertüchtigt, starke Erosions- und Depositionsströme korrekt zu berücksichtigen. Dadurch wurde auch die Anwendbarkeit des Modellsystems auf mittel- bis langfristige Fragestellungen der Schwebstoff- und Morphodynamik verbessert.

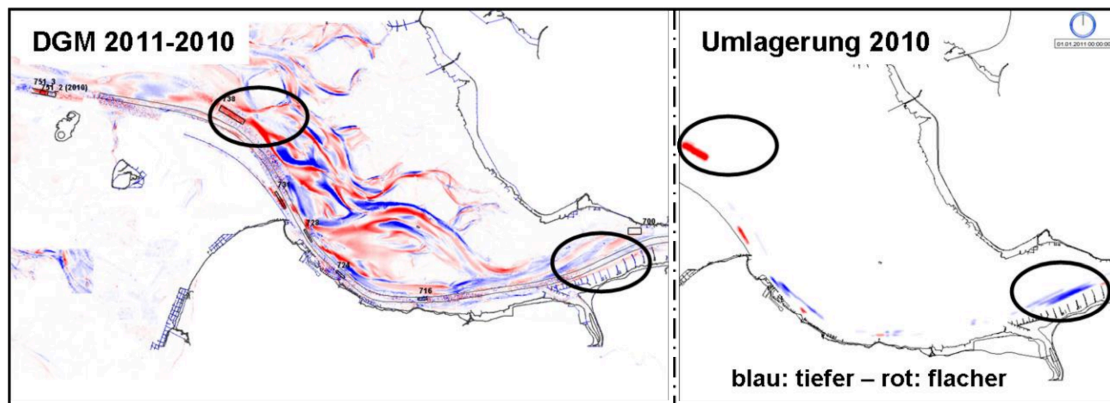


Bild 2: Morphodynamik im Elbmündungsgebiet: Links im Bild sind die Veränderungen der Sohl-tiefe anhand der Differenz der digitalen Geländemodelle für 2011 und 2010 dargestellt. Rechts im Bild ist der Anteil an der Veränderung der Sohl-tiefe dargestellt, der sich allein aus dem Baggern und Umlagern von Sedimenten aufgrund von Unterhaltungsmaßnahmen ergibt.

Als wesentlich für mittel- bis langfristige morphodynamische Untersuchungen wird ein dreidimensionales Bodenmodell angesehen. Dieses soll in der Lage sein, eine stratigraphische Unterteilung des Bodens in Abhängigkeit von der Zusammensetzung der Sedimente darzustellen. Weiterhin soll das Programmpaket SediMorph um Aspekte erweitert werden, die zu einer realitätsnäheren Beschreibung des Systems Boden führen sollen. Ziel ist es, die zeitliche Komponente von Depositionsprozessen und die die Erosion steuernden Parameter besser abbilden zu können.

Eine solche Entwicklung soll in Fortsetzung dieses FuE-Projektes in den nächsten Jahren erfolgen. Mit der Evaluation möglicher Konzepte wurde bereits begonnen.

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

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2014.

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 Ästuarsysteme II (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 ausreichend 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 Untersuchungsziele Ein Wassergütemodul soll 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 Delft3D-WAQ haben ergeben, dass diese Software geeignet ist, für die genannte Fragestellung eingesetzt zu werden. Es zeichnet sich besonders dadurch aus, dass es eine dreidimensionale Berechnung ermöglicht, in der die numerische Diskretisierung des advektiven Transports massenerhaltend ist. Delft3D-WAQ wurde bereits in vielen Untersuchungen weltweit erfolgreich eingesetzt (z.B. Los et al.(2008) und Postma et al, (1999)). Die den Stoffumsetzungen zugrunde liegenden Gleichungen sind gut dokumentiert (Delft Hydraulics, 2003) und die flexible Struktur erlaubt, neue Substanzen und Prozesse einfach hinzuzufügen.

Darüber hinaus zeigte sich, dass Delft3D-WAQ zur Integration in die Modellierungsumgebung von UnTRIM geeignet ist. UnTRIM berechnet bereits viele Größen, die von Delft3D-WAQ benötigt werden, sodass diese nur noch übergeben werden müssen. Darüber hinaus wird perspektivisch eine online-Kopplung beider Verfahren mit Hilfe von GET- und SET-Routinen möglich sein.

Zu Testzwecken wurde eine einfache Modellkombination aus Delft3D-Flow zur Berechnung der hydrodynamischen Größen und Delft3D-WAQ betrieben. Dabei wurde Delft3D-WAQ in einer sehr einfachen und übersichtlichen Konfiguration betrieben, die es bereits ermöglichte, die Konzentration des gelösten Sauerstoffs im Bereich der Tideelbe zu berechnen. Bild 1 zeigt eine Verteilung des berechneten Gehaltes von gelöstem Sauerstoff einschließlich des charakteristischen Absinkens (des sogenannten „Sauerstofflochs“) stromab des Hamburger Hafens.

Diese Modellkombination wurde ebenfalls genutzt, um erste Erfahrungen im Umgang mit Delft3D-WAQ zu sammeln und die Anforderungen an benötigte Messwerte zur Modellsteuerung sowie zum Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Werten zu ermitteln.

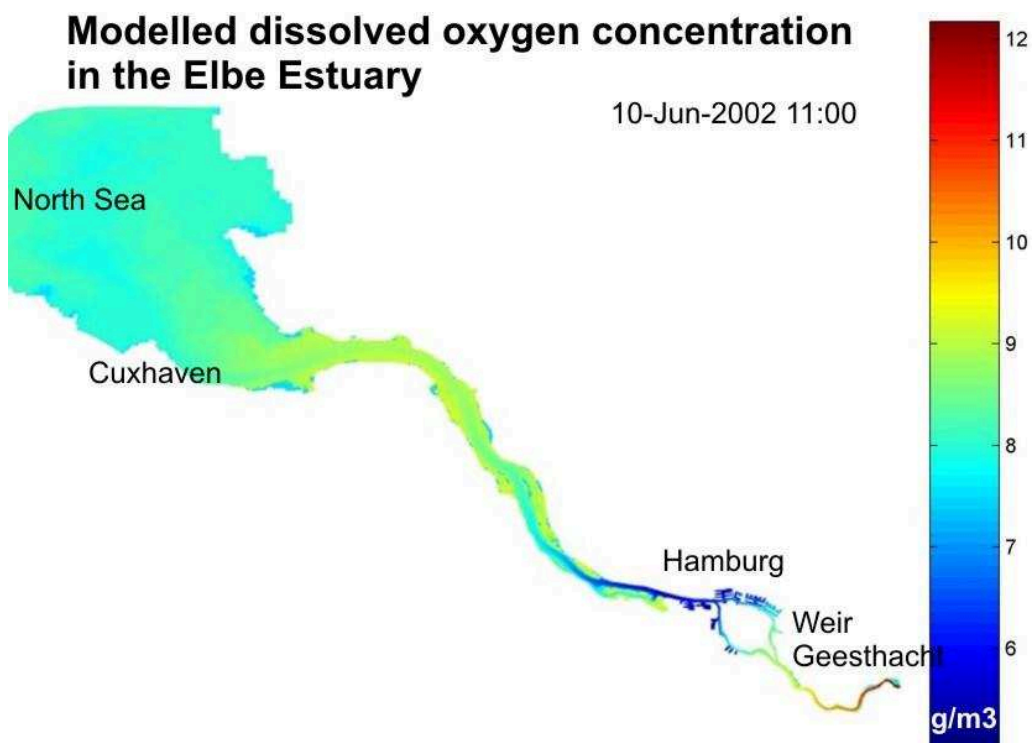


Bild 1: Berechnete Konzentrationen des gelösten Sauerstoffs [g/m³] in der Tideelbe

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 Delft3D-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 Delft3D-WAQ. 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 Sub-Grid-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
2013: Erstellung eines Abschlussberichtes

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2013.

5 Literatur

Delft Hydraulics (2003) Technical Reference Manual Delft3d-WAQ. Delft

Postma, L., Stelling, G.S., Boon, J. (1999) 3dimensional water quality and hydrodynamic modeling in Hong Kong III. Stratification and Water quality. .In Lee, Jayawardena,& Wang (eds.) Environmental Hydraulics, Balkema, Rotterdam.

Los, F.J., Villars, M.T., Van der Tol, M.W.M. (2008) A 3-dimensional primary production model (BLOOM/GEM) and its applications to the (southern) North Sea (coupled physical-chemical-ecological model). Journal of Marine Systems, 74: 259-294

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 sohnnahe 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.

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**).
- Verwenden eines des international gängigen Datei- und Metadatenstandards (**WP2**).
- Re-Integration der Analyse für knotenorientierte Daten (**WP3**).
- Erweiterung der Analyse für nicht knotenorientierte Daten: Kanten, Polygone, Zellen und Zellen-seitenflächen (**WP4**) .
- Erweiterung der Analyse für Daten mit SubGrid (HN-Verfahren UNTRIM²) (**WP5**) .
- Reduzieren der Laufzeit (**WP6**) .
- Integration neuer Analysemethoden (**WP7**) .

2 Untersuchungsmethoden

Um die unter 1.1 aufgezählten Defizite beseitigen und die neuen Ziele erreichen zu können, muss zunächst ein konzeptioneller Entwurf für die neuen Datenanalyse-Programme erstellt werden. Teilweise müssen die Definitionen der Analysegrößen überarbeitet werden, um die aus der SubGrid Technologie resultierenden Anforderungen berücksichtigen zu können

3 Ergebnisse

Arbeitspaket WP1

Die Software wird in Fortran95 entwickelt. Zur besseren Strukturierung werden Module eingesetzt. Module, die von mehreren Anwendungen genutzt werden können, werden in Paketen zusammengefasst. Die Berechnung der Kenngrößen wird über externe Konfigurationsdateien gesteuert. Neue Kenngrößen können damit im Idealfall durch Erweiterung der Konfigurationsdatei hinzugefügt werden.

Arbeitspaket WP2

In Zusammenarbeit mit *Deltares* (Delft) wurde das NetCDF Dateiformat zusammen mit dem CF Metadatenstandard für die Speicherung der Daten und Metadaten ausgewählt. Hierbei wurde CF für Daten auf unstrukturierten Gitternetzen erweitert. NetCDF und CF sind international weit verbreitet. Die wesentlichen Aspekte sind ausführlich in dem BAWiki dokumentiert (siehe „Veröffentlichungen“).

Arbeitspakete WP3, WP4 und WP5

Das in Entwicklung befindliche Programm ANALYSIS ist in der Lage, NetCDF Dateien mit knoten-, kanten- sowie polygonorientierten Daten zu lesen und zu analysieren. Derzeit (Januar 2013) wird die Berechnung der Tide-Kenngrößen des Wasserstandes (re-) implementiert. Daten mit SubGrid werden ebenfalls unterstützt.

Das ebenfalls in Entwicklung befindliche Programm NCAV kann Daten mit und ohne SubGrid visualisieren (siehe Bild 1). Darüber hinaus wurde die Firma smile consult (Hannover) mit der Erweiterung des Visualisierungsprogramms DAVIT für CF NetCDF Daten beauftragt.

Arbeitspaket WP6

Nicht begonnen.

Arbeitspaket WP7

Nicht begonnen.

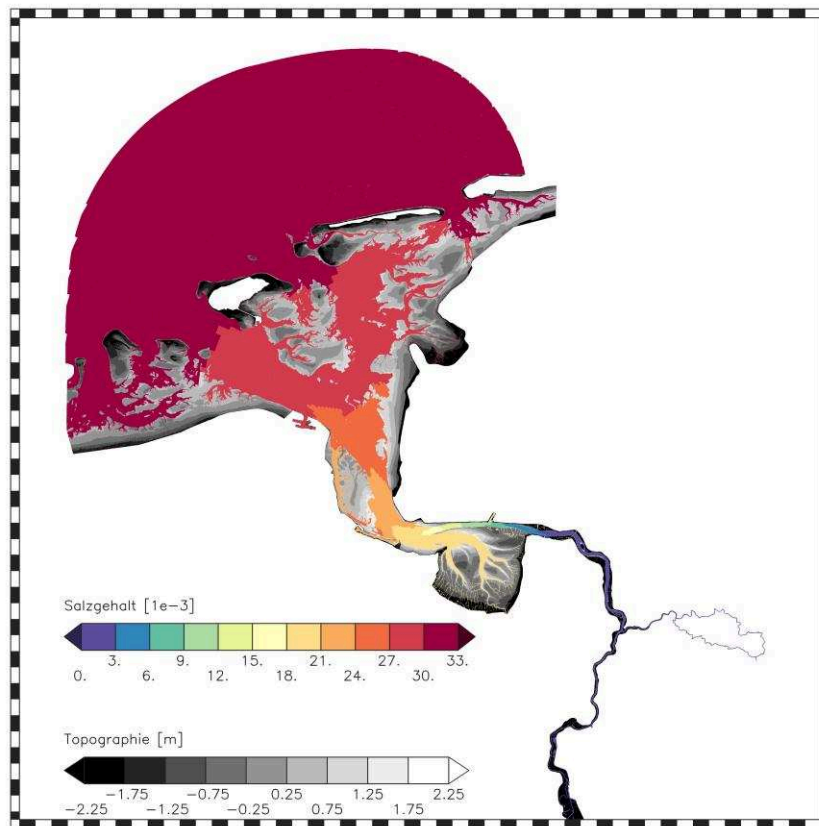


Bild 1: Tiefengemittelter (synoptischer) Salzgehalt im Ems-Ästuar (Farbverlauf). Trocken gefallene Wattflächen (Grauverlauf). Der Salzgehalt ist für jede Zelle des Berechnungsgitters konstant. Die Bathymetrie variiert auf der SubGrid-Skala in jeder Berechnungszelle. Die Daten wurden mit Hilfe von NCAV aus einer CF NetCDF Datei importiert und visualisiert.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: **WP4, WP5** und **WP6**.

2014: **WP6, WP7**.

Laufzeit des Vorhabens von 2011 bis 2013.

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>.

Marine Dateninfrastruktur Deutschland; Vorhaben: Küsteningenieurwesen und Küstenschutz

Netzplan-Nr.: A39550670400

Projektleiter: Dr.-Ing. R. Lehfeldt, Dienststelle Hamburg, Geschäftsstelle KFKI

E-Mail: rainer.lehfeldt@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

In den letzten Jahren haben sich Standards und Technologien im Umfeld von Informationssystemen etabliert, die eine Kommunikation zwischen heterogenen und verteilten Datenhaltungen unterstützen. Dazu gehört der ISO19115-Standard für Metadaten, der ISO19119-Standard für Web-Services, die CS-W-Schnittstelle für Katalog-Dienste zur Kommunikation zwischen Metadaten-Servern und die OGC-konformen 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 Berichtsportal WasserBLick eine wesentliche Rolle.

Derzeit besteht noch ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, um die vorhandenen und zukünftig durch Projekte wie COSYNA (www.cosyna.de) flächendeckend erhobenen Küstendaten in vernetzte Informationssysteme einzubinden, sie darüber standardisiert bereitzustellen und nutzbar zu machen. Dies gilt auch für Untersuchungsszenarien mit numerischen Modellen bei der BAW.

1.2 Bedeutung für die WSV

Durch eine geeignete Vernetzung der Datenquellen wird es zukünftig möglich, in einem ökonomisch vertretbaren Aufwand 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 und die Implementierungsvorschriften von INSPIRE 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 Aufgabebereichen 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. Diese **Harmonisierung** betrifft auch die Darstellungsart und –symbolik für heterogene Datenquellen. 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 setzen zunächst die syntaktische **Interoperabilität** von Daten mit kompatiblen Formaten und standardisiertem Zugang voraus.

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 www.mdi-de.org erfolgte im April 2012. Neben den technisch durch Dienste zusammengeführten Daten werden Ergebnisse und Methoden der vier Teilprojekte präsentiert. Auf öffentlichen Workshops (13. Oktober 2011, 5./6. September 2012) wurden 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 2012 wurde vor allem das gemeinsame Portal beim BSH konsolidiert. Die bisher bei den Infrastruktorknoten vorhandenen Dienste wurden in das Portal integriert und weitere für MSRL und INSPIRE relevante Daten eingebunden. Die verteilt im Netzwerk gepflegten Metadaten werden kontinuierlich vom Portal in einem gemeinsamen Index zusammengeführt (Harvesting), um eine effiziente Recherche zu ermöglichen. 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 aufbereitet und als WMS im Portal integriert. Zusammen mit dem LKN wurden die bereits im Projekt NOKIS++ begonnenen Arbeiten zu einem deutschen Küsten-Gazetteer auf Grundlage vorhandener Karten mit geographischen Namen [StAGN 2005] fortgesetzt. Das Datenmodell des Gazetteers wurde überarbeitet, um einen Gazetteer-Service zu entwickeln. Der zugehörige Klient zur Nutzung dieses Dienstes wird in 2013 fertig gestellt.

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 Kartendienst realisiert.

Das Netzwerk der MDI-DE wird von Infrastruktorknoten [Lehfeldt, R., et al., 2011] bei der BAW, dem BSH und bei den Küstenländern Niedersachsen, Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern getragen. Hier werden die Hard- und Software einer lokalen Serverarchitektur, mit der (Geo-)Daten und Metadaten verwaltet und bereitgestellt werden, eingerichtet. Um es zukünftigen Partnern der MDI-DE einfacher zu machen, einen Infrastruktorknoten aufzubauen, steht ein entsprechender Leitfaden auf dem Portal bereit.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Die Planung bei BAW, BSH und BfG sieht vor, folgende Aufgaben im Projekt MDI-DE zu bearbeiten:

- Wichtigstes Ziel ist Einrichtung eines MDI-DE Portals im Internet.
- Die Infrastruktorknoten bei den Projektpartnern bilden dazu die technische Infrastruktur.
- Darstellungs- und Download- Dienste sollen in das MDI-DE Portal integriert werden.
- Der Küsten- Gazetteer und ein Thesaurus sollen im Portal zur Verfügung gestellt werden.
- Die Metadatenprofile aus NOKIS sollen weiter ausgearbeitet werden, so dass z.B. Modelle, Zeitreihen und Dienste hinreichend beschrieben werden können.
- Vorhandene Werkzeug wie der „DataDiver“ beim BSH zur Visualisierung von Zeitreihen, Profilen und Schnitten sollen, basierend auf einem SOS-Diensten in das MDI-DE Portal, eingebunden werden.
- Für MSRL-Deskriptoren soll die nötige Harmonisierung und Interoperabilität hergestellt werden.
- Es soll eine Schnittstelle zum Wasserblick (<http://www.wasserblick.net>) bei der BfG aufgebaut werden.

Laufzeit des Vorhabens von 2010 bis 2013.

5 Literatur

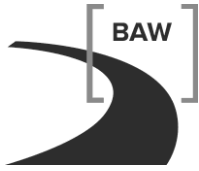
EUROPEAN PARLAMENT AND COUNCIL, EPC (2007): Directive 2007/2/EC establishing an Infrastructure for Spatial Information in the European Community (INSPIRE). Official Journal of the European Union L108, pp. 1-14.

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.

6 Veröffentlichungen

- 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 Planning, 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 Metadata. 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.
- Ständiger Ausschuss für geographische Namen. StAGN (2005): Geographische Namen in den deutschen Küstengewässern.



III. Neue FuE-Vorhaben in 2012

Bemessungskonzept für Wasserbauwerke auf Erdbeben

Netzplan-Nr.: A39510170003

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

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

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

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

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

1.3 Untersuchungsziel

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

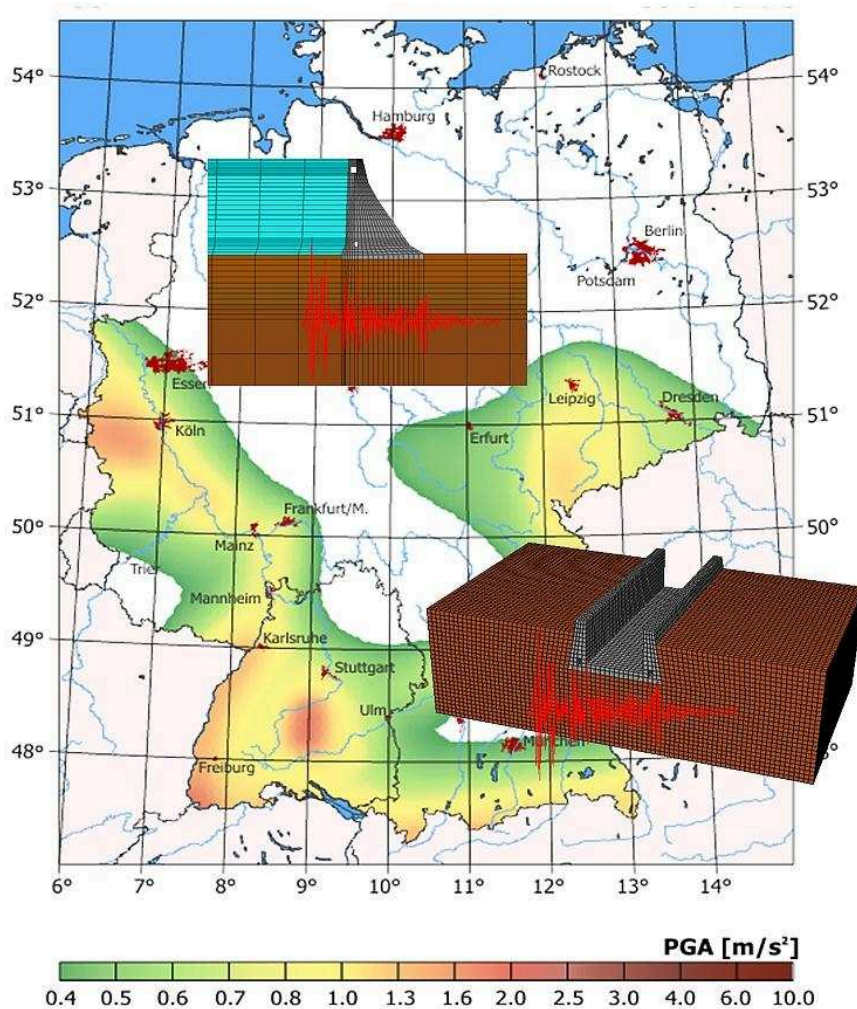


Bild 1: Seismisch aktive Zonen in Deutschland

2 Untersuchungsmethoden

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

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

3 Ergebnisse

Nach Abschluss der Literaturrecherche wurden die ersten Berechnungen mit ABAQUS an einem Stau-mauerquerschnitt durchgeführt (Bild 2). Anhand der Berechnungen wurde der Einfluss des umgebendem Baugrundes und besonders des anstehenden Wassers als Besonderheit bei Wasserbauwerken überprüft und der Einfluss der Erdbebenbelastung auf die Standsicherheit von Staumauern getestet (Bild 3). Damit ist die erforderliche Basis für die numerische Modellierung von Erdbebenbeanspruchungen an massiven Wasserbauwerken gelegt.

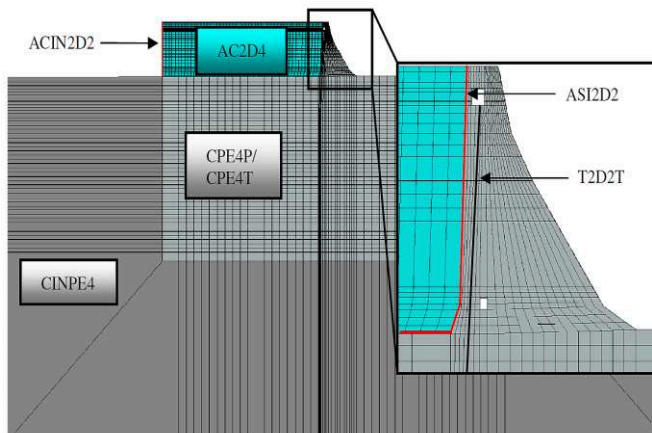


Bild 2: ABACUS-Modell, Elementtypen

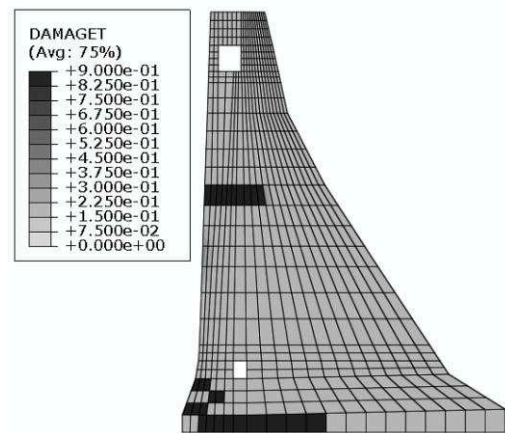


Bild 3: Rissbildung bei Erdbebenbelastung

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Fortführung und Ergänzung der Grundlagenuntersuchungen zur Modellierung des Systems Bauwerk – Boden – Wasser und Beginn mit der Untersuchung an einer für den WSV-Bauwerksbestand repräsentativen Schleuse

2014: Weiterführung der Untersuchungen an einer Schleuse und Übertragung der Ergebnisse auf andere Verkehrswasserbauten; Erarbeitung von Vorgaben für Wasserbauwerke hinsichtlich der Gefährdung infolge Erdbeben.

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

Materialkombinationen für das System Laufrad/Laufschiene

Netzplan-Nr.: A39510270004

Projektleiter/in: Dipl.-Ing. U. Gabrys, Abteilung Bautechnik, Referat Stahlbau und Korrosionsschutz (B2)

E-Mail: ulrike.gabrys@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

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

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

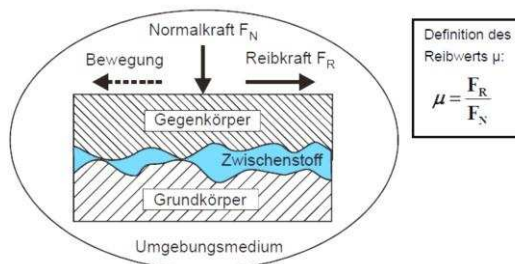


Bild 1: Beispielzeichnung für das Modell eines Tribologischen Systems (aus O. Durst: Korrosions- und Verschleißigenschaften neuartiger, kohlenstoffhaltiger PVD-Schichten; Dissertation 2008)

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

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

1.2 Bedeutung für die WSV

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

Hertzschen Pressung soll sichergestellt werden, dass dieses Maximum nicht in der Übergangszone zwischen Grundmaterial und Auftragsschweißung liegt. Somit wird zukünftig Planungssicherheit hinsichtlich des aufzuschweißenden Materials und der Dicke der Auftragsschweißung erreicht. Diese Angaben sollen zukünftig auch Eingang in die DIN 19704 „Stahlwasserbau“ finden.

1.3 Untersuchungsziel

Standardisierung von möglichen, durch Versuche abgesicherten Materialkombinationen und deren tragsicherheitsrelevanten Nachweise (Hertzschen Pressungen).

2 Untersuchungsmethoden

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

3 Ergebnisse

Es liegen noch keine Ergebnisse vor.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Festlegung des Versuchsumfangs, Ausschreibung und Vergabe der Versuche, Beginn der tribologischen Versuche an mindestens einem System.

2014: Fortführung der tribologischen Versuche an zwei weiteren Laufrad / Laufschiene-Systemen

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2015.

Energetische Optimierung der WSV-Gebäude

Netzplan-Nr.: A39510470001

Projektleiter: Dipl.-Ing. D. Erndwein, Abteilung Bautechnik, Referat Konstruktive Gestaltung (B4)

E-Mail: daniel.erndwein@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Gebäude sind im Mittel zu 40% am Energieverbrauch und an der CO₂-Belastung beteiligt, weshalb hier das größte Einsparpotential gesehen wird. Der Energieverbrauch der WSV-Gebäude wird bisher noch unzureichend erfasst. Eine zentrale Erfassung der Energieverbrauchsdaten in einem Energiemanagement-System hätte zum Vorteil, dass man über Kennwertbildung (Benchmarking) ineffiziente Gebäude identifizieren könnte. Im nächsten Schritt kann man dann gezielt Maßnahmen einleiten, um die Situation in diesen Gebäuden zu verbessern.

Der Aufbau eines kontinuierlichen Energiemanagement eröffnet auch die Möglichkeit Fehler in der Anlagentechnik oder im Betrieb von Gebäuden aufzudecken. Solche Aufzeichnungen ermöglichen den täglichen Betrieb effizienter zu gestalten, ohne dass man große bauliche Veränderungen am Gebäude vornimmt. Die steigenden Anforderungen der Energieeinsparverordnung (EnEV) und die Vorbildfunktion der Bundesbauten führen dazu, dass die Energiekonzepte immer ganzheitlicher und komplexer werden müssen, so dass hier eine langfristige Planung der Einzelmaßnahmen eine immer größer werdende Bedeutung zukommt. In diesem Energiemanagement-System sollen die Energieverbrauchsdaten für Wärme, Strom, und evtl. Wasser, erfasst und bilanziert werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Ein Energiemanagement-System bietet jederzeit einen Überblick über den Energieverbrauch der einzelnen Gebäude der WSV. Die Daten aus der Datenbank bilden die Grundlage für weitere Änderungen bzw. Sanierungen an den Gebäuden der WSV.

Die Bundesregierung hat sich verpflichtet bis zum Jahr 2020 20% Energie einzusparen und 20% der Energieversorgung durch regenerative Energiequellen zu decken. Mit dem Aufbau eines Energiemanagement-System kann die WSV ihren Teil dazu beitragen, damit dieses Ziel erreicht wird.

Größere Energieeffizienz und damit Einsparung von Energie führt auch zu einer Einsparung der laufenden Betriebskosten.

1.3 Untersuchungsziel

Das Ziel ist eine Energieverbrauchserfassung aller WSV-Gebäude zu erreichen und die Daten in einer Datenbank aufzubereiten, um ineffiziente Gebäude über Kennzahlen (Benchmarking) identifizieren und gezielt Sanierungsmaßnahmen durchführen zu können.

Es wird ein kleiner Maßnahmenkatalog für die energetische Sanierung von Gebäuden erstellt werden, der bei den einzelnen Sanierungen als Leitfaden verwendet werden kann.

2 Untersuchungsmethoden

In einem ersten Schritt erfolgt eine Analyse des Gebäudebestandes (Energieverbrauchs- und erste gebäudespezifische Daten). Dann werden exemplarisch Gebäude ausgewählt, die mit Energiebedarfsberechnungen genauer analysiert werden. Für diese Gebäude werden Sanierungsvarianten erarbeitet und rechnerisch überprüft, um den Prozess einer Gebäudeoptimierung beispielhaft darzustellen. In einem weiteren Schritt wird ein Gebäudemonitoring installiert, um eine effiziente Betriebsweise der Gebäude auf Dauer sicherzustellen und WSV-weit die Überblicks-Funktion herzustellen.

3 Ergebnisse

Zur Analyse des Gebäudebestandes wurde in 2012 ein Energieverbrauchs-Erfassungsbogen entwickelt. Mit Hilfe dieses Bogens wurde eine WSV-weite Abfrage von Gebäude- und Energieverbrauchsdaten durchgeführt. Die Rücklaufquote lag erfreulich hoch bei ca. 90%. Jedoch wurden lediglich 40 % der Er-

fassungsbögen vollständig ausgefüllt, so dass nur von diesen ein gesicherter Energieverbrauchskennwert ermittelt werden konnte, der den Anforderungen der EnEV gerecht wird.

Es sind aktuell 349 Gebäude von 150 Außenbezirken/Bauhöfen aus 35 Ämtern erfasst und teilweise analysiert.

Bei einem Großteil der erfassten Gebäude ist es oftmals unklar, was von den Zählern genau erfasst wird, weil keine genaue Dokumentation des Bestandes vorhanden ist. In einigen Fällen gibt es auch nur einen Zähler für die gesamte Liegenschaft, so dass in diesen Fällen auch Verbräuche mitgezählt werden, die der Hafenbeleuchtung oder anliegenden Schiffen geschuldet sind, somit nichts mit dem Gebäudeverbrauch gemein haben.

Generell lässt sich feststellen, dass die Datengrundlage zu den einzelnen Gebäuden sehr inhomogen ist. Ein durchschnittliches Gebäude eines Außenbezirk/Bauhof wurde im Jahr 1968 gebaut und hat eine Fläche von 517 m². Es wird mit einer Gasheizung beheizt, die ca. 15 Jahre alt ist und gleichzeitig für die Warmwasserbereitstellung zuständig ist.

Eine große Bandbreite zeigen die Primärenergiekennwerte von Gebäuden verschiedener Außenbezirke und Bauhöfe in der WSV (Bild 1).

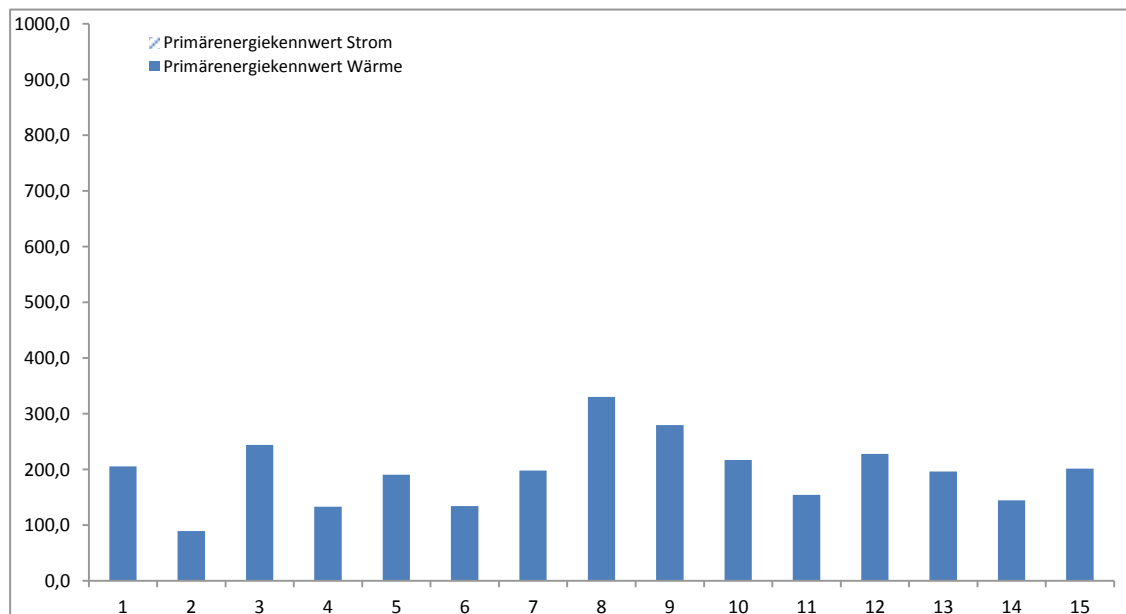


Bild 1: Primärenergiekennwerte basierend auf dem Wärme- bzw. Stromverbrauch der letzten 3 Jahre in kWh/m²a von Gebäuden der Außenbezirke und Bauhöfe.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

- 2013:
- Analyse der erfassten Energieverbrauchs- und gebäudespezifischen Daten
 - Auswahl der Beispielobjekte
 - Erste Bedarfsberechnungen der Beispielobjekte
 - Entwicklung von beispielhaften Sanierungskonzepten
- 2014:
- Analyse und Bewertung der Sanierungskonzepte
 - Zusammenstellung der Ergebnisse

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

5 Literatur

-/-

6 Veröffentlichungen

-/-

Modellierung des Tragverhaltens von Verpressankern in Sand

Netzplan-Nr.: A39520270003

Projektleiterin: Dipl.-Ing. X. Stodieck, Abteilung Geotechnik, Referat Grundbau (G2)

E-Mail: xenia.stodieck@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Verpressanker weisen ein äußerst komplexes Tragverhalten auf, welches von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst wird. Da die Vorgänge des Lastabtrags in den Boden und die Einflüsse verschiedener Herstellungsparameter auf den Herauszieh Widerstand wenig bekannt ist, basiert die Bemessung von Verpressankern bisher auf empirischen Werten. Falls für die Vorbemessung nicht genügend Erfahrungswerte für die örtlichen Baugrundverhältnisse zur Verfügung stehen, müssen gegebenenfalls im Vorfeld Probeanker für vorgezogene Eignungsprüfungen hergestellt werden. Um die in der Ausführungsstatik geforderte Tragfähigkeit nachzuweisen, ist in der Regel für jede Baumaßnahme eine Eignungsprüfung an drei Anker und nach der Herstellung an jedem Anker ein Belastungstest (Abnahmeprüfung) vorgeschrieben. Die Feststellung des tatsächlichen Herauszieh Widerstandes erfordert jedoch eine Belastung bis zum Versagen des Ankers.

Für die realistische Simulation des Tragverhaltens von Verpressankern ist die Berücksichtigung der einzelnen Mechanismen des Tragverhaltens (Verbund zwischen Zement und Boden, Verspannung im Baugrund durch Dilatanz, Lastumlagerung am Verpresskörper etc.) notwendig. Diese sind bisher jedoch noch nicht ausreichend untersucht. Unter anderem ist nicht vollständig geklärt, inwiefern die Ankerherstellung und insbesondere der Verpressvorgang den Spannungszustand und die Bodeneigenschaften des anstehenden Bodens verändert und welchen Einfluss die Höhe des Verpressdrucks auf den Herauszieh Widerstand hat. Da die mechanischen Eigenschaften und der Spannungszustand des anstehenden Bodens jedoch entscheidend für die realistische Simulation des Tragverhaltens von Verpressankern sind, ist eine zuverlässige numerische Berechnung des Herauszieh Widerstands bisher nicht möglich.

1.2 Bedeutung für die WSV

In der WSV wird jährlich eine Vielzahl von Verpressankern hergestellt. Die Tragfähigkeit dieser Anker ist neben den Baugrundeigenschaften und dem Ankertyp trotz normativer Regelungen maßgeblich von der Herstellung beeinflusst, d. h. verschiedenen Firmen bzw. auch Kolonnen einer Firma erreichen unterschiedliche Herauszieh Widerstände. Gelingt es, maßgebliche Herstellungsparameter zu identifizieren, können diese entsprechend gefordert und überwacht werden. Des Weiteren ermöglicht ein Besseres Verständnis des Tragverhaltens von Verpressankern gegebenenfalls die numerische Prognose des Herauszieh Widerstands und eine Validierung der zurzeit üblichen empirischen Abschätzung.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel ist die Entwicklung eines numerischen Modells, welches das Tragverhalten von Verpressankern unter bestimmten Randbedingungen abbildet. Als Grundlage für die numerische Simulation sollen die Mechanismen der Lastabtragung sowie die Herstellungseinflüsse zur Optimierung der Ankertechnik ermittelt werden.

2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen der Herstellung von Probeankern finden an verschiedenen Standorten Druckmessungen im Bohrloch während und nach dem Verpressvorgang statt. Verpressanker werden mit Drucksensoren bestückt, um die Verteilung des Verpressdrucks über die Verpresskörperlänge zu untersuchen. Sondierungen mit einem Flat-Dilatometer sollen Aufschluss über den Einfluss der Ankerherstellung auf den Spannungszustand im angrenzenden Boden geben.

Ergänzend zu den Feldversuchen wird anhand von Laborversuchen das Filtrationsverhalten von Zementsuspension in Sand sowie die die mechanischen Eigenschaften des noch nicht ausgehärteten Verpressgutes untersucht.

Auf der Grundlage der durchgeführten Feld- und Laborversuche findet anschließend die Entwicklung ein numerisches Modells statt, welches den Einfluss des Herstellungsprozesses und verschiedene Mechanismen des Tragverhaltens von Verpressankern berücksichtigt. Anschließend ist eine Validierung des numerischen Modells durch Nachrechnen instrumentierter Ausziehversuche vorgesehen.

3 Ergebnisse

Als Grundlage für die Entwicklung eines numerischen Modells fanden im Berichtsjahr Untersuchungen der Einflüsse der Ankerherstellung in nichtbindigen Böden statt.

Bereits im Vorfeld der Projektlaufzeit wurden in Zusammenarbeit mit der Uni Trondheim (NTNU), Norwegen, Sensoren für die Messung des Verpressdrucks im Bohrloch entwickelt, hergestellt und eingesetzt. Zusätzlich zu den Druckmessungen im Bohrrohr wurden in etwa 1 m Entfernung vom Bohrloch Erdruckmessungen mit einem Flat-Dilatometer durchgeführt.

Ergänzende Laborversuche an der NTNU in Trondheim gaben Aufschluss über das Filtrationsverhalten der Zementsuspension sowie die mechanischen Eigenschaften des Filterkuchens. In einer ersten Testserie mit Sand als Filtermedium war kein offensichtliches Eindringen des Zements in den Porenraum des Sandes festzustellen und ein klarer Übergang zwischen Sand und Zement zeichnete sich ab. Daher wurde in den folgenden Tests auf den Einbau des Sandes als Filtermedium verzichtet und ein Filterstein mit Filterpapier verwendet.

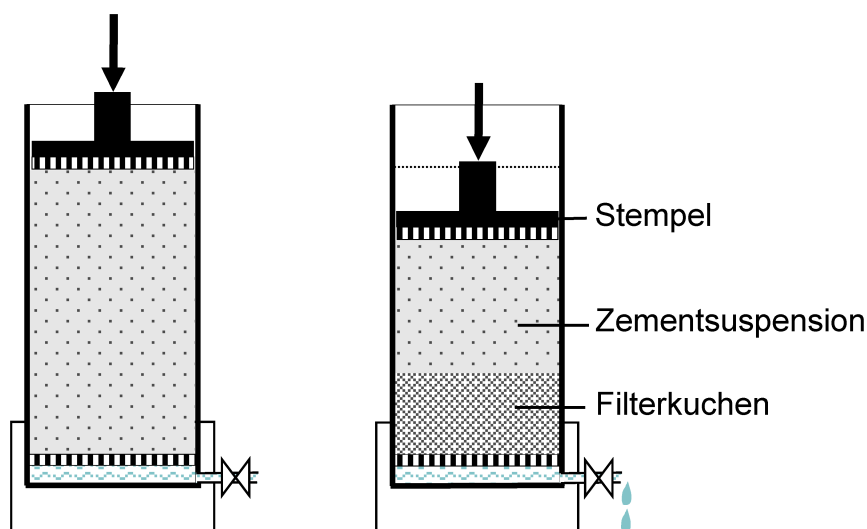


Bild 1: Schematische Darstellung des Filtrationsversuchs

In 19 Versuchsreihen wurde der Wassergehalt der Zementsuspension zwischen $w/z = 0,4$ und $0,6$ variiert und Verpressdrücke zwischen 2 und 15 bar verwendet. Die Versuche zeigen einen linearen Zuwachs der Filterkuchendicke mit $\sqrt{\text{Zeit}}$. Die festgestellte Filtrationsrate der Zementsuspension ist abhängig vom Wassergehalt der Suspension und vom Verpressdruck. Je höher der Druck und je geringer der Wassergehalt, desto schneller bildet sich ein Filterkuchen aus.

Zur Berechnung des Filtrationsvorganges von Zementsuspension wurden zwei verschiedene Ansätze gegenübergestellt: Zwei-Phasen Filtrationstheorie (McKinley, 1999) und Terzaghi-Konsolidierung (Lee, 2012; Picandet, 2011). Für beide Modelle wurden Berechnungsparameter über Rückrechnung der Versuchsergebnisse ermittelt. Das verwendete Zwei-Phasen Filtrationsmodell ist ein analytischer Ansatz, basierend auf der Ausfilterung von Feststoffteilchen aus einer Flüssigkeit. Die Berechnung mit diesem Modell ermöglicht die direkte Ermittlung der Filterkuchendicke. Bei der Berechnung mittels Konsolidierungstheorie hingegen geht diese nicht aus der Berechnung hervor, kann aber über den Konsolidierungsgrad abgeschätzt werden.

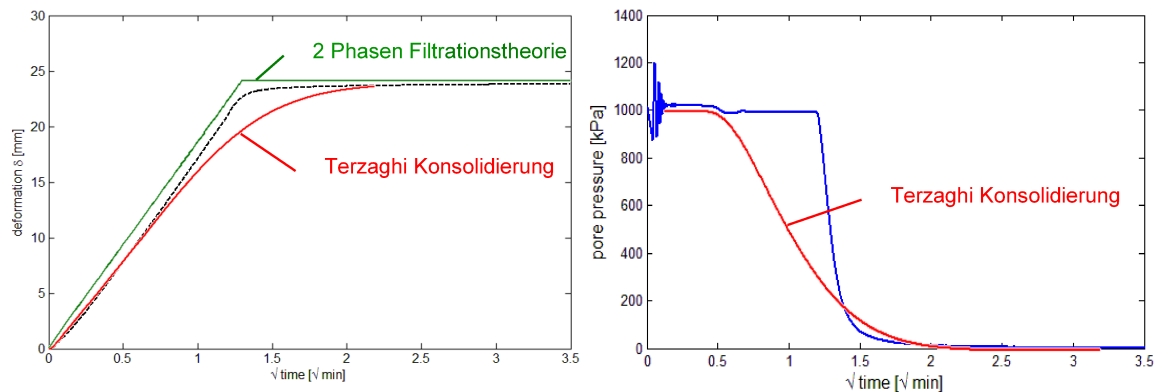


Bild 2: Typisches Ergebnis eines Filtrationstests. Vertikale Stempelbewegung (links) und Porenwasserdruck gemessen am Stempel (rechts)

Im Anschluss an die Filtrationsversuche erfolgte eine Untersuchung der Eigenschaften des Filterkuchenmaterials.

Der Wassergehalt des Filterkuchenmaterials lag für Verpressdrücke $\geq 500\text{kPa}$ im Mittel bei 0,29, während er für geringe Verpressdrücke 0,32 betrug. Die Wasserdurchlässigkeit des Filterkuchens liegt zwischen $k=3 \times 10^{-8}$ und 2×10^{-7} m/s, abhängig von der Porenzahl des Filterkuchens. Belastungstests des nicht ausgehärteten Filterkuchenmaterials im Einaxialen-Durckversuch zeigten eine Druckfestigkeit von über 200 kPa.

Triaxialversuche sowie Ödometerversuche mit dem nicht ausgehärteten Filterkuchenmaterial wurden durchgeführt um „bodenmechanische Eigenschaften“ wie die spannungsabhängige Steifigkeit bei Erst- und Wiederbelastung, Reibungswinkel und Kohäsion zu bestimmen. Die Auswertung der Versuchsergebnisse steht noch aus.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

In der aktuellen Projektphase findet die abschließende Auswertung der bereits durchgeführten Labor- und Feldversuche statt. Auf der Grundlage der Versuchsergebnisse erfolgt anschließend die Entwicklung eines numerischen Modells eines Verpressankers unter Berücksichtigung der Ankerherstellung und verschiedener Mechanismen des Lastabtrags.

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

5 Literatur

- Lee, S.-W. et al. 2012. "Effect of pressurized grouting on pullout resistance and group efficiency of compression ground anchor". *Canadian Geotechnical Journal*. 49 (8): 939-953.
- McKinley, J. D., und M. D. Bolton. 1999. "A geotechnical description of fresh cement grout - filtration and consolidation behaviour". *MAGAZINE OF CONCRETE RESEARCH*. 51 (5): 295-308.
- Picandet, V. et al. 2011. "Permeability measurement of fresh cement paste". *Cement and Concrete Research*. <http://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00716295>.

6 Veröffentlichungen

- Stodieck, X. und Benz, T. „Cement grout filtration in non-cohesive soils“. Eingereicht bei *International Conference on Installation Effects in Geotechnical Engineering*, 2013, Rotterdam.

Kolmation als Schlüsselgröße der Wechselwirkung Oberflächenwasser – Grundwasser

Netzplan-Nr.: A39520370003

Projektleiter: Dipl.-Geol. D. Straßer, Dr.-Ing. H.J. Lensing, Abteilung Geotechnik,
 Referat Grundwasser (G3)

E-Mail: daniel.strasser@baw.de, hoerby.lensing@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Interaktion zwischen Oberflächengewässern und Grundwasser wird neben den hydrogeologischen Randbedingungen maßgeblich durch die Gewässerstruktur, Substratzusammensetzung der Gewässersohle und der Ausbildung des Grundwasserleiters gesteuert. Hierbei ist die Kolmation einer Gewässersohle, d.h. alle Vorgänge, die zu einer Reduktion des Porenvolumens, einer Verfestigung, des Filtermediums und zu einer Durchlässigkeitsabnahme der Gewässersohle führen, als Schlüsselgröße zu sehen. Prinzipiell wird zwischen einer äußeren Kolmation, d.h. einer Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen auf der Gewässersohle, einer inneren Kolmation, d.h. der Eintrag und die anschließende Ablagerung von Wasserinhaltsstoffen in die Gewässersohle sowie einer biologischen und auch physiko-chemischen Kolmation, d.h. einer Förderung der Kolmationsbildung durch biologische sowie physiko-chemische Prozesse, unterschieden. Dabei wird die Kolmation von Gewässersohlen von zahlreichen, zeitlich und räumlichen variablen Einflussfaktoren beeinflusst (Bild 1).

Die maßgebenden Parameter für die Kolmation sind nach SCHÄCHLI, 1992 die Sohlenschubspannung, der hydraulische Gradient zwischen Grundwasser und Oberflächengewässer, die Schwebstoff- und Geschiebehaushalt des Oberflächengewässers und die Kornverteilung der Gewässersohle.

Die Verteilung der hydraulischen Durchlässigkeit im angrenzenden Grundwasserleiter hat zudem einen maßgeblichen Einfluss auf die Kolmation. Die Durchlässigkeitsverteilung des Grundwasserleiters ist meist sehr heterogen.

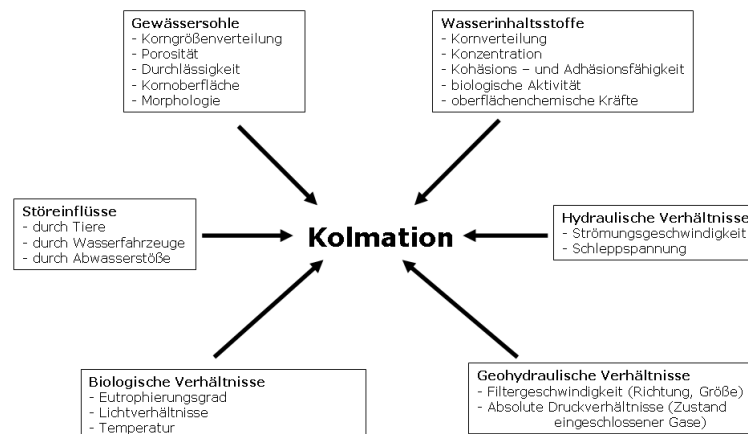


Bild 1: Einflussgrößen der Kolmation (SCHÄCHLI, 1992)

Dadurch liegt i.d.R ein heterogenes Strömungsfeld zwischen Oberflächengewässer und Grundwasser vor, so dass die Gewässersohlstruktur entsprechend ausgebildet ist. Zudem werden Gewässersohlstrukturen auch stark durch zeitlich variierende äußere Faktoren (z.B. jahreszeitlichen Unterschiede im Abflussregime und im Sedimenttransport) sowie durch das wasserbaulichen Regelungskonzept geprägt. Insgesamt ergeben sich dadurch sehr komplexe Wirkungszusammenhänge.

Die komplexen Wirkungszusammengänge zahlreicher Einflussfaktoren sind durch zahlreiche Forschungsaktivitäten bereits identifiziert und untersucht sowie in der Fachliteratur beschrieben worden. Jedoch sind bisher kaum Untersuchungen durchgeführt worden, die die Randbedingungen, die an Bundeswasserstrassen anzutreffen sind, berücksichtigen.

Dadurch ist eine belastbare Prognose von Auswirkungen, die durch wasserbauliche Maßnahmen bedingt sind, auf die Wechselwirkung Oberflächengewässer und Grundwasser im Bereich der Bundeswasserstrassen, nur unzureichend möglich.

Die Schwerpunkte der bisher durchgeführten Forschungsarbeiten auf diesem Themengebiet, beschränken sich zum größten Teil auf die Kolmationsphänomene bei freifließenden Gewässern in alluvialen nicht-bindigen Ablagerungen (z.B. SCHÄCHLI, 1993), auf die Rolle der Wechselwirkungen zwischen Grundwasser und Oberflächenwasser auf Flora und Fauna in der hyporheischen Zone (z.B. BRUNKE und GONSER, 1997) sowie auf ihre Bedeutung auf die natürliche Grundwasserneubildung (z.B. MITCHELL-BRUKER et al.) .

Für die im Rahmen des FuE-Vorhabens relevanten Einflussfaktoren wurden Laborversuchen durchgeführt (SCHÄCHLI, 1993). Wie bereits BLASCHKE et al. (2003) feststellte, erfolgte jedoch bisher noch keine Verifizierung der Ergebnisse dieser Laborversuche anhand von Feldversuchen. Zudem gibt es auch kaum Untersuchungen, die die Randbedingungen, die für die Bundeswasserstrassen charakteristisch sind berücksichtigen (z.B. Geschiebemanagement, Einwirkungen durch schiffsinduzierte Strömungen, Einfluss wasserbaulicher Bauwerke, Einfluss von Hochwasserereignisse, Stauhaltung, etc.).

1.2 Bedeutung für die WSV

Durch Unterhalts-, Ausbau und Renaturierungsmaßnahmen an Bundeswasserstrassen können die Wechselwirkungen zwischen Fließgewässer und dem angrenzenden Grundwasserkörper maßgeblich verändert werden. In Flussabschnitten mit einer naturnahen Wasserstandsdynamik lassen sich baubedingte Auswirkungen auf die quantitativen und qualitativen Grundwasserverhältnisse derzeit nicht mit der erforderlichen Genauigkeit prognostizieren.

Diese Wissensdefizite führen bei verkehrswasserbaulichen Maßnahmen im Einflussbereich von aquatischen Ökosystemen, deren Schutz und deren Zustandsverbesserung als Ziel der EU-WRRL explizit formuliert sind, sowie im Einflussbereich konkurrierender Wassernutzungen (z.B. Uferfiltratfördernder Trinkwasserfassungen) zu einem erhöhten wasserwirtschaftlichen Konfliktpotenzial. Die fachlichen und juristischen Auseinandersetzungen bei der Bearbeitung aktueller Ausbauprojekte der WSV zeigen auf, dass insbesondere im Bereich grundwasserabhängiger Ökosysteme neben den naturschutzfachlichen Aspekten vor allem konkurrierende wasserwirtschaftliche Anforderungen für die Genehmigung maßgeblich sind.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel dieses FuE-Vorhabens ist es, die einzelnen – für die Bundeswasserstrassen relevanten – Wirkungsfaktoren dieser komplexen Wechselwirkungen zu identifizieren und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Kolmationsprozesse näher zu bewerten. Ein weiteres Ziel des FuE-Vorhabens ist die Bewertung verschiedener hydrogeologischer Methoden hinsichtlich ihrer Aussagefähigkeit und ihren Anwendungsgrenzen in Bezug auf die Kolmationsfragestellung.

Dadurch soll zukünftig eine Prognose und Bewertung der geohydraulischen Auswirkungen von wasserbaulichen Unterhalts- und Ausbaumaßnahmen mit der erforderlichen zeitlichen und räumlichen Auflösung ermöglicht werden, um wirtschaftlich und naturschutzfachlich optimierte Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen umsetzen zu können. Die Forschungsergebnisse bilden eine wichtige Grundlage um Flüsse, Seen und Kanäle als umweltverträgliche Verkehrswege zu erhalten und gleichzeitig eine Optimierung des ökologischen Zustands gemäß EU-WRRL (und damit assoziierte Umweltziele wie z.B. Erhaltung der Biodiversität usw.) zu erreichen und somit einen Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung der Bundeswasserstrassen leisten zu können.

2 Untersuchungsmethoden

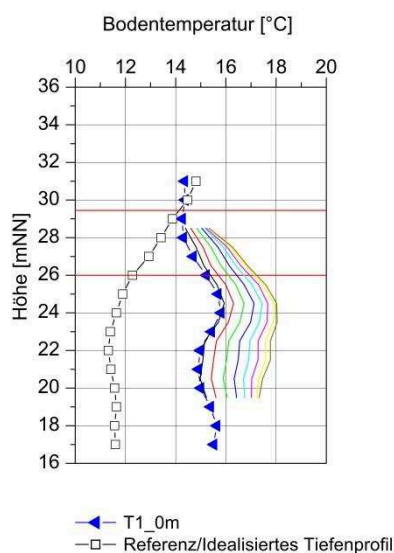
Am Versuchsstandort Potsdam wurden im Zeitraum zwischen September und November 2012 zwei Transekte zur kontinuierlichen tiefenorientierten Bodentemperaturmessung installiert. Durch die Verwendung der Oberflächenwassertemperatur als natürlichen Tracer können hierdurch Grundwasserfließpfade im Untergrund identifiziert und Infiltrationsgeschwindigkeiten sowie Verweilzeiten bestimmt werden. Der Sacrow-Paretzer wurde hierfür gezielt als Versuchsstandort gewählt, da im Juli 2013 bei Ausbauarbeiten die Sohle des Kanals vertieft wird. Hierbei wird die vorhandene Kolmationsschicht stark gestört und teilweise entfernt.

Begleitet wird die Messung der tiefenorientierten Bodentemperatur durch Monitoring der Grundwasserstände und -temperaturen in 13 Grundwassermessstellen des WNA Berlin sowie der Stadtwerke Potsdam.

Ergänzend zu den Bodentemperaturmessungen sind weiterhin in Zusammenarbeit mit der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) Untersuchungen des Sauerstoffisotopenverhältnisses von Niederschlag, Grundwasser und Oberflächenwasser geplant.

Bereits im Vorfeld der Ausbauarbeiten wurde der „Ist-Zustand“ im Dezember 2012 durch eine flächendeckende Beprobung der Gewässersohle (Freeze-Core, Infiltrationsversuche) dokumentiert.

3 Ergebnisse



Die ersten Ergebnisse der Bodentemperaturmessungen im Bereich des Nedlitzer Durchstichs zeigen deutlich eine Infiltration von Oberflächenwasser in den Grundwasserleiter an (Bild 2). Die gemessenen Werte weichen deutlich von denen eines idealisierten Tiefenprofils der Bodentemperatur ohne Oberflächenwassereinfluss ab. Der hohe zeitliche Versatz des Durchschlags der Oberflächenwassertemperatur zum Messpunkt zeigt eine Kolmation des untersuchten Bereichs an.

Bild 2: Ergebnisse der Bodentemperaturmessungen im Bereich Nedlitzer Durchstich

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Bodentemperaturmessungen und Isotopenuntersuchungen an Grundwasser- und Oberflächenwasserproben begleitend zum Ausbau des Sacrow-Paretzer-Kanals
 Freeze-Core Entnahmen und Infiltrationsversuche zur Dokumentation der Ausprägung der Kolmationsschicht

Durchführung von Laborversuchen zur Überprüfung der Eignung von Wassertemperatur als Tracer zur Bestimmung maßgeblicher Prozessparameter der Interaktion zwischen Oberflächenwasser und Grundwasser

2014: Aus- und Bewertung der Ergebnisse inklusiver der Erstellung eines 3D Finite-Elemente-Modells;
 Erstellung eines Abschlussberichts

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

5 Literatur

- Blaschke et. al., 2003: Clogging Processes in Hyporheic Interstices of an Impounded River, the Danube at Vienna, Austria, *Internat. Rev. Hydrobiol.* 88, 397 – 413
- Brunke und Gonser, 1997: The ecological significance of exchange processes between rivers and groundwater, *Freshwater Biology*, 37, 1-33
- Mitchell-Bruker et al., 1996: Modeling steady state conjunctive groundwater and surface water flow with analytical elements – *Water Resources Research*, 32 2735 - 2732
- Schälchli, 1993: Die Kolmation von Fließgewässersohlen: Prozesse und Berechnungsgrundlagen – Technische Hochschule Zürich (VAW) Nr. 124

Numerische Simulation von hydraulisch induziertem Sedimenttransport in Erdbauwerken

Netzplan-Nr.: A39520470005

Projektleiterin: H. Pfletschinger, Abteilung Geotechnik, Referat Erdbau und Uferschutz (G4)

E-Mail: heike.pfletschinger@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Durchsickerung von Erdbauwerken aufgrund hydraulischer Potentialunterschiede beeinflusst deren innere und äußere Stabilität. Mögliche Versagensmechanismen resultieren u.a. aus Partikeltransport im Erdbauwerk, der zu einer Veränderung der Porenstruktur und somit zu einer Veränderung der hydraulischen und mechanischen Bodeneigenschaften führen kann. Die Nicht-Linearität und starke Kopplung der hydraulischen Transport- und damit induzierten Strukturänderungsprozesse erschweren eine numerische Berechnung und Prognose der inneren Standsicherheit von Erdbauwerken. Bisherige numerische Modelle beschreiben i.d.R. nur Teilprozesse oder spezielle, kontrollierte Laborversuche. Erprobte kommerzielle Programme mit gekoppelten hydro-mechanischen Berechnungen basieren meist auf der Finite Elemente Methode und sind damit in ihrer Anwendung auf Fragestellungen, die Porenstruktur und Einzelkorngefüge betreffen, eingeschränkt (z.B. Plaxis, Code Bright).

Zur Erweiterung bestehender kontinuumsmechanischer mathematischer Beschreibungen nach der Theorie Poröser Medien (TPM) (z.B. de Boer, 2000) wurden u.a. am Lehrstuhl Kontinuumsmechanik der Ruhr-Universität Bochum Ansätze entwickelt, in denen die poröse Struktur eines Bodenkörpers als Mehrphasenkontinuum dargestellt wird. Entsprechend der Problematik der Beschreibung von Erosionsprozessen umfasst das Modell eine erodierbare Phase, eine feste Phase, sowie eine Fluid-Phase und eine Suspensions-Phase (z.B. Steeb und Scheuermann, 2011). Die Mikrostruktur des Bodens wird hierbei durch eine volumetrische Quantifizierung der einzelnen Phasen auf die makrostrukturelle Betrachtung übertragen. In weiteren Arbeiten gilt es, diese Ansätze zu verifizieren und zu erweitern.

1.2 Bedeutung für die WSV

Eine zuverlässige numerische Darstellung gekoppelter hydraulischer und geomechanischer Prozesse in Erddämmen ergänzt bestehende Stabilitätsberechnungen und Filterbemessungsmethoden. Die Berücksichtigung der Mikrostruktur und kontinuumsmechanische makrostrukturelle Berechnungsansätze ermöglicht die Simulation einsetzender Erosionsprozesse mit bestehenden Finite Elemente Programmen unter Einsatz relativ niedriger Rechnerleistung.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Arbeit ist es, geeignete numerische Methoden zur Darstellung von Fluid-Festkörper-Interaktionen in Erdbauwerken unter hydraulischem Potential zu testen bzw. weiterzuentwickeln. Hierbei sollen insbesondere Prozesse des hydraulischen Materialtransports und resultierende Änderungen der mechanischen Bodeneigenschaften anhand der Theorie Poröser Medien simuliert werden.

2 Untersuchungsmethoden

Es werden sowohl anhand von Literaturstudien, als auch durch praktische Tests verschiedene numerische Methoden auf ihre Eignung zur Darstellung gekoppelter hydro-mechanischer Prozesse in porösen Medien geprüft.

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl Kontinuumsmechanik der Ruhr-Universität Bochum werden bestehende mathematische Beschreibungen zur Simulation interner Erosion in Erdbauwerken anhand der TPM diskutiert, getestet und entsprechend der Fragestellung erweitert. Die Grundlagen der Methode liegen in der Erstellung eines thermodynamisch konsistenten Gleichungssystems unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Phasen eines Boden-Wasser-Gemischs. Zur numerischen Implementierung des mathematischen Konzeptes wird das Finite Elemente Programm COMSOL Multiphysics verwendet. Bestehende und entwickelte Modellansätze werden anhand von Mess- und Erfahrungswerten aus Versuchen und der Praxis evaluiert.

3 Ergebnisse

Nach Recherche für verschiedene numerische Methoden zur Eignung für die Darstellung gekoppelter hydro-mechanischer Prozesse in porösen Medien ist das vorgestellte Mehrphasenkonzept nach der Theorie Poröser Medien ein vielversprechender Ansatz und bildet den weiteren Schwerpunkt der Arbeit.

Das bestehende mathematische Modell wird bereits eingesetzt zur Simulation grundsätzlicher Prozesse der Infiltration (Schaufler et al., 2012). Da die an der BAW vorhandenen bodenmechanischen numerischen Simulationsprogramme Plaxis und Abaqus nicht zur Implementierung des gewählten mathematischen Ansatzes geeignet sind, wurde das Finite Elemente Programm Comsol Multiphysics angeschafft. Innerhalb des mathematischen Moduls, in dem eigene partielle Differentialgleichungen implementiert werden können, wurde zunächst ein einfaches 2-Phasen-System zur Konsolidierung beschrieben.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013:

- Erweiterung des mathematischen Grundmodells entsprechend der Fragestellungen der BAW und Prüfung bestehender Modellannahmen
- Implementierung des Modells in COMSOL Multiphysics für standardisierte Anfangs-Randwertprobleme
- Entwicklung von kleinskaligen Modellversuchen zur Verifizierung des Modells für standardisierte Anfangs-Randwertprobleme

2014:

- Erweiterung der Modellkomplexität
- Durchführung von komplexeren Versuchen an der Wechseldurchströmungsanlage zur Modellverifizierung
- Sensitivitätsanalyse der Modellparameter
- Evaluation der gewählten Methodik
- Formulierung für weiteren Entwicklungsbedarf

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

5 Literatur

de Boer, R.: Theory of Porous Media. Highlights in the historical development and current state. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2000.

Schaufler, A.; Becker, C.; Steeb, H.:

Infiltration processes in cohesionless soils. In: ZAMM-Z. Angew. Math. Me., in press, 2012. doi:10.1002/zamm.201200047.

Steeb, H.; Scheuermann, A.:

Modelling internal erosion: A continuum based model enriched by microstructural information. In: J. Geotech. Geoenviron., under review, 2011.

Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen

Netzplan-Nr.: A39530170004

Projektleiter: Dipl.- Ing. W. Kampke, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich, Flusssysteme I (W1)

E-Mail: wolfgang.kampke@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

Zur Gewährleistung der ökologischen Durchgängigkeit unserer Fließgewässer sind funktionstüchtige Fischaufstiegsanlagen (FAA) an Stauanlagen unabdingbare Bausteine. Die Funktionsfähigkeit dieser FAA hängt in erster Linie von zwei Faktoren ab, der Auffindbarkeit und der Passierbarkeit. Das Thema der Auffindbarkeit einer Fischaufstiegsanlage beinhaltet die Fragestellung, ob wanderwillige Fische, die direkt bis in das Unterwasser einer Staustufe gelangen, in der Lage sind, den Einstieg in die FAA ohne größere Verzögerungen zu finden. Die besondere Herausforderung an Bundeswasserstraßen ist, dass die mit der Strömung aus der Fischaufstiegsanlage konkurrierende Strömung im Auslaufbereich des Kraftwerks bzw. des Wehrs so dominant ist, dass eine für den Fisch wahrnehmbare Leitströmung schwierig zu realisieren ist. Ziel des Forschungsvorhabens ist es, für die Verhältnisse an Bundeswasserstraßen Bemessungskriterien abzuleiten, die die kleinräumige Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen und die Erzeugung einer für den Fisch wahrnehmbaren Leitströmung verbessern und die es dem planenden Ingenieur erlauben, den Einstieg der FAA und dessen Beaufschlagung zuverlässig zu gestalten und zu dimensionieren.

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Schwerpunkte der bisher durchgeführten Forschungsarbeiten zur Auffindbarkeit von FAA sowie der aktuelle Stand des Wissens, der im Wesentlichen in DWA-M 509 (DWA 2010), im Handbuch Querbauwerke (Dumont et al. 2005) und in einigen internationalen Publikationen dokumentiert ist, sind bislang nur unzureichend auf die Randbedingungen an größeren Fließgewässern bezogen.

Wesentlich für eine Weiterentwicklung der Bemessungsstandards ist eine verbesserte Kenntnis über das artspezifische Wanderverhalten von Fischen. Da die Untersuchung dieser Fragestellung mit lebenden Fischen mit großem Aufwand verbunden ist, wird in einem ersten Schritt die hydraulische Optimierung der Strömungssituation im Unterwasser von Wehr- und Wasserkraftanlagen angestrebt.

Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Untersuchung der Einflüsse von unterschiedlichen Turbinencharakteristika und Betriebsmodi auf die Strömungsverhältnisse und somit auf die Konkurrenzsituation zur Fischpass-Leitströmung.

Weiterer Forschungsbedarf besteht im Hinblick auf die Möglichkeit durch ein geräumigeres Turbinen- und Wehrsteuerungsmanagement die hydraulischen Randbedingungen im Nahfeld der Fischaufstiegsanlage und somit die Auffindbarkeit zu verbessern.

1.2 Bedeutung für die WSV

Im Zuge der Umsetzung der Europäischen Wasserrahmenrichtlinie und der Änderung des Wasserhaushaltsgesetzes fällt die Herstellung der ökologischen Durchgängigkeit und insbesondere des Fischaufstieges in den gesetzlichen Auftrag der WSV. Im Hinblick auf die Dringlichkeit der Maßnahmen und der großen Zahl von ca. 250 durchgängig zu gestaltenden Stauanlagen, besteht ein großes Bedürfnis nach neuen Erkenntnissen und daraus abgeleiteten Bemessungskriterien für FAA an Bundeswasserstraßen.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel der Untersuchung ist es, Kriterien abzuleiten, die es dem planenden Ingenieur erlauben, den Einstieg der Fischaufstiegsanlage und dessen Beaufschlagung für die Verhältnisse an den Bundeswasserstraßen zuverlässig zu gestalten und zu dimensionieren, sodass eine für den Fisch wahrnehmbare Leitströmung erzeugt wird (AP 1). Des Weiteren sollen die Auswirkungen von Wasserkraftanlagen auf die Strömungsverhältnisse im Unterwasser von Stauanlagen identifiziert werden, um zum einen die Auffindbarkeit der Fischaufstiegsanlagen zu verbessern und zum anderen die bestehenden numerischen Modellierung weiterzuentwickeln (AP 2). Darüber hinaus sollen die Aus- und Wechselwirkung von Kraftwerks-, Wehr- und Schleusensteuerungen auf die hydraulischen Randbedingungen an Stauanlagen untersucht und Steuerungskonzepte zur Optimierung der Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen entwickelt werden (AP 3).

2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungsmethoden orientieren sich an den jeweiligen Fragestellungen innerhalb der einzelnen Arbeitspakete. Mittels physikalischen Modelluntersuchungen werden der Einfluss von baulichen Veränderungen auf die hydraulischen Randbedingungen im Nahfeld von FAA (AP 1), die Beschreibung des Strömungsfeldes im Unterwasser einer Stauanlage für verschiedene Kraftwerksausgestaltungen (AP 2), sowie die Aus- und Wechselwirkungen von Kraftwerks-, Wehr und Schleusensteuerungen auf die hydraulischen Randbedingungen an Stauanlagen analysiert (AP 3). Numerische Modelluntersuchungen werden zur Betrachtung des Unterwasserbereichs der Stauanlagen bzw. des Kraftwerkes durchgeführt (AP 1, 2 und 3). Ebenfalls im Rahmen aller Arbeitspakete werden Naturmessungen mit ADV bzw. ADCP an den Pilotstandorten durchgeführt. Ergänzend kommen zur Betrachtung unterschiedlicher Einstiegsgestaltungen von FAA ethohydraulische Untersuchungen zum Einsatz.

3 Ergebnisse

Im Rahmen des AP 1 wurden Naturmessungen an der Stauanlage Nassau durchgeführt, um die Funktionsfähigkeit und Wirksamkeit eines neuartigen Lamellensystems zur Verbesserung der Leitströmung zu untersuchen. Bild 1 stellt die Strömungsverhältnisse am Einstieg der FAA bei zwei unterschiedlichen Lamellenstellungen dar. Die Messungen zeigten, dass die angewandte innovative Untersuchungsmethodik von parallelen ADV und ADCP Messungen zur hydraulischen Bewertung der Leitströmung geeignet ist. Des Weiteren konnten die erwarteten hydraulischen Effekte der Lamellen, wie beispielsweise eine Verstärkung der Leitströmung bei den betrachteten Abflusszuständen beobachtet werden.

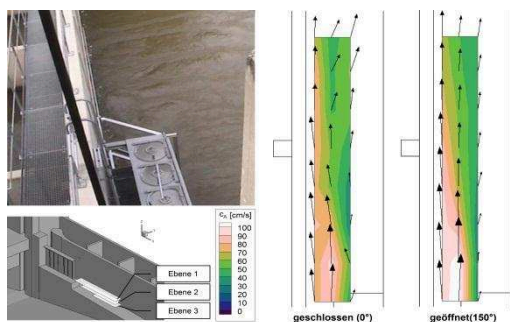


Bild 1: Strömungsverhältnisse im UW der WKA bei zwei unterschiedlichen Lamellenstellungen

Im Zuge der Untersuchungen zur Optimierung der Einstiegsgestaltung der FAA Lauffen/Neckar konnte anhand von physikalischen Modellversuchen eine Vorzugsvariante der Einstiegsgeometrie entwickelt, sowie die erforderliche Leitströmungsmenge der FAA ermittelt werden (vgl. Bild 2). Diese Erkenntnisse dienen des Weiteren dazu, erste generelle Empfehlungen zur erforderlichen Leitströmungsmenge bei Planungen von FAA an Bundeswasserstraßen zu liefern.

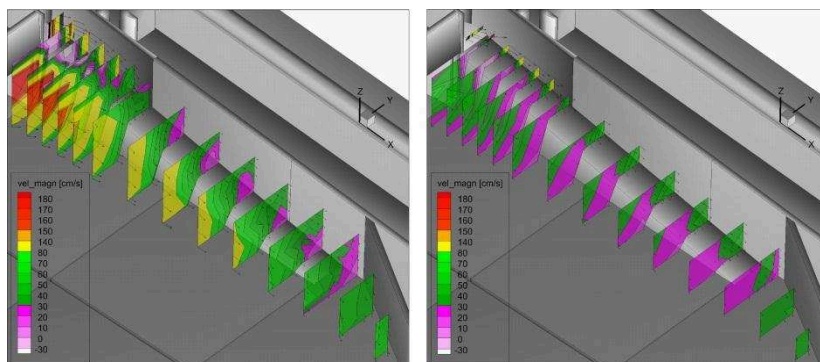


Bild 2: Ausbildung der Leitströmung im UW der Stauanlage für den Ausführungsvorschlag des Einstieges der FAA (links: bei Q330, rechts: bei Q30)

Im Rahmen einer Vorstudie innerhalb des AP 2 wurden bereits verfügbare Daten von Stauanlagen mit wasserkraftspezifischen Attributen zusammen gestellt. Zur Ergänzung der Datensätze und Aufbau einer

entsprechenden Datenbank wurde ein Fragebogen erarbeitet, der an die entsprechenden Kraftwerksbetreiber versandt wird.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013:

- Untersuchung verschiedener Arten der Einstiegsgestaltung in FAA im physikalischen Modell (AP 1)
- Naturmessungen an Pilotstandorten (AP 1, 2 und 3)
- Aufbau 3D-HN Modelle der Pilotstandorte (AP 1, 2 und 3)
- Auswertung Fragebogen WKA-Charakteristika, sowie Aufbau Datenbank (AP 2)
- Einrichtung des Turbinenversuchsstandes an der TU München sowie erste Messungen (AP 2)
- Untersuchung von Wechselwirkung von Kraftwerks-, Wehr und Schleusensteuerungen mittels 2D-HN Modell sowie physikalischem Modell (AP 3)

2014:

- Untersuchung verschiedener Arten der Einstiegsgestaltung in FAA im physikalischen Modell (AP 1)
- Ethohydraulische Untersuchungen für verschiedene Einstiegsgestaltungen (AP 1)
- Naturmessungen an Pilotstandorten (AP 1, 2 und 3)
- Untersuchungen am Turbinenversuchsstand an der TU München (AP 2)
- Weiterentwicklung 2D-HN Modell zur Untersuchung von Wechselwirkung von Kraftwerks-, Wehr und Schleusensteuerungen (AP 3)

2015:

- Untersuchung verschiedener Arten der Einstiegsgestaltung in FAA im physikalischen Modell (AP 1)
- Ethohydraulische Untersuchungen für verschiedene Einstiegsgestaltungen (AP 1)
- Naturmessungen an Pilotstandorten (AP 1, 2 und 3)
- Weiterentwicklung 3D-HN-Modell durch Implementierung der Turbinencharakteristika (AP 2)

2016:

- Untersuchung verschiedener Arten der Einstiegsgestaltung in FAA im physikalischen Modell (AP 1)
- Weiterentwicklung 3D-HN-Modell durch Implementierung Turbinencharakteristika (AP 2)
- Entwicklung von Steuerungskonzepten zur Optimierung der Auffindbarkeit von FAA (AP 3)

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2016.

5 Literatur

- Dumont, U., P. Anderer & U. Schwevers (2005): Handbuch Querbauwerke. Düsseldorf (Ministerium für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und ländlichen Raum NRW), 212 S.
- DWA – Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (2010): Merkblatt DWA-M 509 Fischaufstiegsanlagen und Fischpassierbare Bauwerke – Gestaltung, Bemessung, Qualitätssicherung. – Gelbdruck Februar 2010, 285 S

6 Veröffentlichungen

- Kampke, W.; Scholten, M.; Rüter, A. (2012): FuE-Konzept von BfG und BAW - Projekte zur groß- und kleinräumigen Auffindbarkeit - Tagungsband des Kolloquiums von BAW und BfG "Herstellung der Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen: Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen – Herausforderung, Untersuchungsmethoden, Lösungsansätze“, 12. bis 13. Juni 2012, Karlsruhe (BAW - Bundesanstalt für Wasserbau)
- Eckhardt, J.; Klüber, C. (2012): Methoden zur Gestaltung und Planung der Leitströmung - Beispiele an Lahn und Neckar – Tagungsband des Kolloquiums von BAW und BfG "Herstellung der Durchgängigkeit an Bundeswasserstraßen: Auffindbarkeit von Fischaufstiegsanlagen – Herausforderung, Untersuchungsmethoden, Lösungsansätze“, 12. bis 13. Juni 2012, Karlsruhe (BAW - Bundesanstalt für Wasserbau)
- Klüber, C.; Dumont, U.; Kampke, W.; Sokoray-Varga, B.; Weichert, R. (2012) – Near-Field Attractivity of Fishways – Investigations of an innovative entrance design to enhance the attraction flow, Proceedings of the 9th ISE 2012, Vienna. International Symposium on Ecohydraulics (2012)

Untersuchungen zur Herstellung bzw. Verbesserung der Sedimentdurchgängigkeit an der Staustufe Iffezheim

Netzplan-Nr.: A39530170005

Projektleiter/in: Dr.-Ing. A. Wahrheit-Lensing, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,
Referat Flusssysteme I (W1)
Dr.-Ing. M. Schröder, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,
Referat Flusssysteme I (W1)

E-Mail: andrea.wahrheit-lensing@baw.de
michael.schroeder@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die erhebliche Verminderung der Strömungsgeschwindigkeiten oberhalb und im Nahbereich von Staustufen führt häufig zu regelmäßig wiederkehrenden Sedimentanlandungen, die unterschiedliche negative Auswirkungen auf den Betrieb und die Sicherheit der Stauhaltung haben können. Aus diesem Grund werden diese Anlandungen regelmäßig durch eine Baggerung entfernt.

Im Bereich der Staustufe Iffezheim sind die gebaggerten Sedimente zudem durch HCB belastet, so dass das Baggergut als Schadstoff behandelt und deponiert werden muss, was zu einer enormen Kostensteigerung führt.

Hinsichtlich der Prozesse, die zu Anlandungen in Stauhaltungen führen, besteht ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf. Fragestellungen im Zusammenhang mit dem Transport von Sedimenten in Stauhaltungen sind zu klären, wobei hydrodynamisch-numerische Modelluntersuchungen, Laborversuche und Naturmessungen zum Einsatz kommen sollen.

1.2 Bedeutung für die WSV

Das WSA Freiburg hat in einem Sachstandsbericht die Problematik der Sedimentation im Wehrkanal Iffezheim und die damit zusammenhängenden Maßnahmenaktivitäten seit der Inbetriebnahme der Staustufe Iffezheim zusammengestellt. Aufgrund der seit 2005 ausgeschöpften Unterbringungsmöglichkeiten im Bereich der Staustufe und der nicht möglichen Verspülbarkeit des Baggergutes, ist das WSA Freiburg gezwungen neue Maßnahmen zur Verminderung der regelmäßig anfallenden Baggermengen und Möglichkeiten zur kostengünstigen Unterbringung des Baggerguts zu suchen. Deshalb sind in o.g. Sachstandsbericht Optimierungsmöglichkeiten, die kurz-, mittel- und langfristige Lösungswege aufzeigen, dargestellt. Dabei wird deutlich, dass die Problematik im Wehrkanal Iffezheim nicht mit einem allumfassenden einmaligen Eingriff gelöst werden kann. Es sind daher mehrere Ansätze zu prüfen und zu präzisieren, die langfristig zu einer wirtschaftlichen Gesamtlösung der Problematik im Wehrkanal Iffezheim führen könnten.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel ist es, Handlungsanweisungen für das Sedimentmanagement unter Berücksichtigung verschiedener hydrologischer und baulicher Situationen zu erarbeiten.

Dazu wurde in der BAW bereits in den Jahren 2006 – 2008 ein TELEMAC-3D-Modell vom Nahbereich der Staustufe Iffezheim aufgebaut und zur Durchführung von ersten hydrodynamischen und morphologischen Berechnungen getestet.

Die Weiterentwicklung des 3D-Modells der Staustufe Iffezheim ist notwendig und zielt auf eine möglichst realistische Nachbildung derjenigen Prozesse, die zu den Anlandungen im Wehrkanal von rd. 150.000 m³/a führen. Aus heutiger Sicht erscheint es sinnvoll, die Modellrechnungen auf Berechnungsgittern mit unterschiedlichen Auflösungen durchzuführen.

2 Untersuchungsmethoden

3D-hydrodynamisch-numerisches Modell der Staustufe Iffezheim

a) Mit einem sehr hoch aufgelösten **Modell A** wird eine Large-Eddy Simulation möglich, die ein weites Turbulenzspektrum abdeckt. Mit dem Modell A soll das Prozess- und Systemverständnis zu den Anlagungen im Wehrkanal verbessert werden. Der Simulationszeitraum wird sich dabei vermutlich auf einen Bereich von Stunden oder Tagen erstrecken.

b) Mit einem zweiten **Modell B** von geringerer Auflösung wird ebenfalls eine Large-Eddy Simulation durchgeführt, die dann nur noch die größten turbulenten Strukturen abbildet. Das Modell B soll einen Simulationszeitraum von rd. 3 Monaten abdecken, der etwa dem mittleren Zeitraum zwischen zwei Peilungen entspricht und damit eine konkrete Möglichkeit zur Modellkalibrierung und -validierung bietet.

c) Mit einem **Modell C** soll ein Simulationszeitraum von mehreren Jahren betrachtet werden, um die langfristigen hydrologischen Einflüsse zu berücksichtigen. Eine natürliche Begrenzung dieses längeren Simulationszeitraums ist durch die wiederkehrenden Baggerungen gegeben, die in den Jahren 2001, 2005 und 2011 erfolgten.

Die unterschiedlichen Modelle A, B und C sind hinsichtlich ihrer Aussagekraft aufeinander abzustimmen. Verschiedene Methoden der Laufzeitbeschleunigung sollen an den Modellen evaluiert werden.

An die Weiterentwicklung bzw. Adaption des 3D-Modells ergeben sich somit folgende Anforderungen hinsichtlich Modellauflösung und Abbildung der relevanten Strömungs- und Sedimentationsprozesse:

Modellauflösung. Aufgrund der seit 2006 gestiegenen Rechnerleistung kann die Modellauflösung gegenüber dem vorhandenen 3D-Modell deutlich erhöht werden. Dies betrifft insbesondere die Modelle A und B.

Vertikale Impulsbilanzierung. Das Absetzverhalten der sehr feinen Sedimente in der Stauhaltung wird insbesondere durch die vertikale Strömungsgeschwindigkeit beeinflusst. Aus diesem Grund soll im Gegensatz zu den früheren Untersuchungen auf die vereinfachende Vernachlässigung der vertikalen Impulsbilanz (hydrostatische Druckannahme) verzichtet werden.

Turbulenzmodellierung. Neben den klassischen statistischen Turbulenzmodellen (k - ϵ -Modell, k - ω -Modell) soll zumindest in den Modellen A und B die Large-Eddy Simulation (LES) zur Turbulenzmodellierung eingesetzt werden. Hierzu ist es im Modell A anzustreben, die das Sedimentationsgeschehen maßgeblich beeinflussenden Wirbelgrößen durch das Strömungsmodell abzubilden.

Sedimenttransportmodellierung. Mit den Weiterentwicklungen am hydrodynamischen Modell soll eine möglichst realitätsnahe Nachbildung der Strömungsprozesse im Bereich der Staustufe erzielt werden. Danach sollen nach Bedarf Weiterentwicklungen am Sedimenttransportmodell vorgenommen werden, die z.B. die Mehrkornmodellierung, das Konsolidierungsmodell, das Flockungsmodell sowie allgemein die Quell- und Senkenterme betreffen. Hierzu sind Veränderungen am Programmcode (Fortran 90/95) in enger Zusammenarbeit mit dem BAW-Referat W5 „Numerische Verfahren im Wasserbau“ vorzunehmen.

2D-hydrodynamisch-numerisches Modell der Staustufe Iffezheim

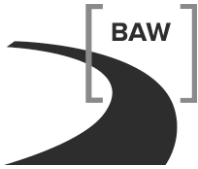
Untersuchungen, die für die gesamte Stauhaltung durchgeführt werden müssen, z.B. zur Bewertung des Hochwasserschutzniveaus anhand der Einhaltung der Freiborde, werden aufgrund der erforderlichen Modellausdehnung mit einem tiefengemittelten 2D-Modell vorgenommen.

Labor- und Naturuntersuchungen

Nach Bedarf sollen Laboruntersuchungen und Naturmessungen zur Ermittlung von Sedimentparametern durchgeführt werden, die für den Betrieb des 3D-Modells benötigt werden.

3 Ergebnisse

In Kooperation mit der RWTH Aachen wurde im November 2012 damit begonnen das bestehende 3D-TELEMAC-Modell aus dem Jahre 2006 zu reaktivieren und auf die heute relevanten Verhältnisse und Datengrundlagen anzupassen (Einbau einer 5. Turbine im Kraftwerksbereich, aktuelles Geländemodell mit Flächenpeilungen).



4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Aufbau der o.g. unterschiedlichen 3D-hydrodynamisch-numerischen Modelle,
Durchführung von Natur- und Laboruntersuchungen,
Anwendung der Modelle auf folgende Fragestellungen

- Bauliche und betriebliche Maßnahmen, Unterhaltungsmaßnahmen
- Anlandungen und morphologisches Gleichgewicht
- Sedimentparameter
- Hochwasserschutzniveau und Freiborde

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

Entwicklung eines vereinfachten Füllsystems für Sparschleusen

Netzplan-Nr.: A39530370002

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

E-Mail: carsten.thorenz@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Für Sparschleusen mit großer Hubhöhe hat sich in Deutschland ein Füllsystem mit einer Druckkammer unter der eigentlichen Schleusenammer als einfache Gestaltungsvariante bewährt. Hierbei dient die Druckkammer zur gleichmäßigen Verteilung des einströmenden Füllwassers von Oberstrom und den Sparbecken. Die Einläufe werden dabei aufwändig gestaltet und möglichst tief angeordnet, um das Einziehen von Luft in das Füllsystem zu verhindern. Im Zuge der Bearbeitung der hydraulischen Gestaltung des Füll- und Entleersystems der neuen Schleusen Erlangen und Kriegenbrunn wurde die Idee verfolgt, auf Umläufe (und die zugehörigen Schütze) sowie einen tiefliegenden Einlaufbereich zum Anschluss an das Oberwasser vollständig zu verzichten. Hierzu wurde ein Konzept entwickelt, bei dem das Druckkammerfüllsystem direkt über ein Drucksegmentobertor beaufschlagt wird. Erste numerischen Untersuchungen zeigten, dass die hydraulische Leistungsfähigkeit bei Normalbetrieb den Anforderungen entspricht (*Thorenz und Strybny, 2012*). Im gestörten Betrieb ohne Sparbecken ist jedoch mit einem verstärkten Eintrag von Luft in das Füllsystem zu rechnen, welche die globalen Strömungseigenschaften des Systems maßgeblich beeinflussen könnten. Möglichst genaue Informationen über das Verhalten der Luft-Wasser-Strömung im untersuchten System sind daher von großer Bedeutung. Im Bereich der gegenständlichen Maßstabsmodelle ergeben sich durch die Skalierung unvermeidbare Maßstabeffekte, die bei Luft-Wasser-Gemischen dazu führen, dass der tatsächliche Lufteintrag und die daraus entstehenden Effekte nicht maßstabsgetreu abgebildet werden. Dies resultiert vor allem daraus, dass an der Phasengrenzfläche die Oberflächenspannung des Wassers eine entscheidende Rolle spielt, welche selbst bei der Verwendung eines Ersatzfluids mit entsprechender Oberflächenspannung das Verhalten der Luftblasen im Wasser nur fehlerhaft abbilden kann (*Chanson, 1999*). Bei der Untersuchung von Strömungen mit Hilfe von numerischen Werkzeugen können nur dann brauchbare Ergebnisse erzielt werden, wenn alle physikalisch relevanten Prozesse im Modellansatz hinreichend genau abgebildet werden. Die im Wasserbau üblichen computergestützten Modelle, die auf den Navier-Stokes-Gleichungen mit einem Volume-of-Fluid-Ansatz basieren, sind nur bei sehr hoher Gitterauflösung geeignet, den erwarteten Lufteintrag abzubilden. Es muss daher ein alternativer Ansatz gefunden werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Das vereinfachte Füllsystem hätte erhebliche Vorteile: Kein großer und tiefer Einlauf wie bei anderen Sparschleusen mit großer Hubhöhe, durch den Verzicht auf Umläufe eine reduzierte Anzahl von schlecht erreichbaren Betriebsverschlüssen, eine reduzierte Größe der Baugrube und des Gesamtbauwerks. Es ist davon auszugehen, dass dieses Konzept bei Realisierbarkeit zu einer erheblichen Reduzierung der Baukosten und der Betriebskosten großer Sparschleusen führt.

1.3 Untersuchungsziel

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, ein vorentworfenen, neuartiges Füllsystem für Sparschleusen auf seine Praxistauglichkeit zu untersuchen und ggf. zu verbessern. Dazu ist es erforderlich, auch die numerischen Werkzeuge für die Berechnung von Luft-Wasser-Gemischen sowie die Bewegung von Schiffen in der Kammer weiterzuentwickeln. Diese Weiterentwicklungen stellen ein wichtiges Nebenziel dar, da sie für vielfältige weitere Aufgaben anwendbar sind.

2 Untersuchungsmethoden

Im Rahmen des Vorhabens soll ein anwendungsorientierter numerischer Ansatz für die Beschreibung von Zweiphasenströmungen entwickelt werden, mit dem die Modellierung von unterschiedlichen Strömungsregimes für Luft-Wasser-Gemische innerhalb eines Rechengebietes ermöglicht wird. Mit Hilfe dieses Ansatzes soll es möglich werden, ingenieurwissenschaftliche Fragestellungen im Bereich von Luft-

Wasser-Strömungen besser untersuchen zu können. Der entwickelte Ansatz soll möglichst in eine frei verfügbare CFD-Software (z.B. OpenFOAM, *Weller et al.*, 1998) implementiert werden. Parallel sollen die verfügbaren numerischen Methoden im Hinblick auf Luft-Wasser-Gemische sowie die Bewegung des Schiffs in der Kammer weiterentwickelt werden. Zum Vergleich wird ein Labormodell des vorgestellten Schleusenkonzepts erstellt. Da die Naturähnlichkeit der Luftblasenbewegung im Labormodell nicht gegeben ist, soll das Labormodell verwendet werden, um die Entwicklungen im numerischen Modell im Labormaßstab zu validieren, um dann mit dem numerischen Modell die Skalierung auf den Naturmaßstab durchzuführen.

3 Ergebnisse

Durch eine intensive Literaturrecherche wurde die Anwendbarkeit der bestehenden numerischen Modellansätze für die Modellierung von Luft-Wasser-Gemischen für die oben beschriebene Problematik überprüft. Für Flüssigkeit-Gas-Strömungen sind momentan die folgenden Modellansätze üblich:

- Phasengrenzen auflösende Verfahren über Volume-of-Fluid-Methode (VoF-Methode) oder Level-Set-Methode
- Euler-Euler-Verfahren (u.a. Zwei-Fluid-Modell)
- Euler-Lagrange-Verfahren

In Verfahren, die die Phasengrenze auflösen, werden die Erhaltungsgleichungen wie für einphasige Strömungen gelöst. Durch das Einführen einer zusätzlichen Indikatorfunktion kann die Lage der Phasengrenze und damit die lokal anzusetzenden Fluideigenschaften bestimmt werden. Geeignet ist diese Methode besonders für Systeme mit Luft und Wasser, in denen keine große Vermischung auftritt. Luftblasen im Wasser oder Wassertropfen in der Luft können mit diesem Ansatz nur bei sehr feiner Gitterauflösung (Blasen-/Tropfengröße \gg Gitterweite) abgebildet werden.

Das Euler-Euler-Verfahren dagegen eignet sich für die Abbildung von Strömungen, in denen sich die Phasen gegenseitig durchdringen, da hier für jede Phase ein Satz Erhaltungsgleichungen gelöst wird. Hier werden die Gasblasen parametrisiert und es kann das summarische Verhalten auch kleinster Gasblasen im Wasser abgebildet werden. Um das verschiedene Verhalten von verschiedenen Blasengrößen im Zwei-Fluid-Modell möglichst genau abzubilden, werden die Partikelgrößen (hier: Blasen) entweder mit Hilfe einer Größenverteilungsgleichung („population balance equation“ vgl. *Silva, Lage 2011*) abgebildet oder es wird ein Mehrphasen-Ansatz gewählt, bei dem jede Blasengröße als Einzelphase behandelt wird (vgl. *Krepper et al. 2008*). Die größte Herausforderung dieses Ansatzes stellt die empirische Ermittlung der Terme dar, über welche die Interaktion zwischen den Phasen (Blasenerzeugung und -zerfall, Koaleszenz) gesteuert wird.

Beim Euler-Lagrange-Verfahren werden für die disperse Phase Newtonsche Bewegungsgleichungen für jedes einzelne disperse Partikel aufgestellt, die kontinuierliche Phase wird wie bei den anderen Verfahren über die Erhaltungsgleichungen als variable Funktionen von Raum und Zeit dargestellt. Bei einem hohem Anteil der dispersen Phase führt dieses Verfahren schnell zu einem sehr großem Rechenaufwand.

Um die oben beschriebenen Verfahren zu verbessern und anwendungstauglich zu gestalten, wurden in letzter Zeit verschiedene Methoden entwickelt, mit deren Hilfe einige der genannten Nachteile kompensiert werden können. Zum einen wird versucht, die verschiedenen Modelle zu koppeln, zum anderen werden die bestehenden Ansätze verändert und/oder erweitert. Von den betrachteten Ansätzen aus der Literatur könnten die folgenden zwei Ansätze für die Weiterentwicklung für den oben genannten Anwendungsfall von größerem Interesse sein und in Betracht gezogen werden:

- Generalized two-phase flow model (GENTOP) (*Hänsch et al.*, 2012) (Erweiterung eines Mehrphasen-Modelles (inhomogeneous Multiple Size Group Model) um eine kontinuierliche Phase))
- Gekoppeltes Modell für zweiphasige Flüssigkeits-Gas-Strömungen mit komplexem Strömungsregime (Yan, Che, 2009)

Das GENTOP Verfahren basiert auf einem Euler-Euler-Ansatz für polydisperse Systeme (vgl. MUSIG-Modell (*Krepper et al. 2008*)). Im Speziellen werden die Blasen oder Tropfen nach Größen gruppiert, für jede Größen-Gruppe wird ein Satz von Bilanzgleichungen gelöst. Alle Partikel die größer als eine definierte maximale Partikelgröße sind, werden in die Klasse eingeordnet, die die freie Oberfläche darstellt. Durch zusätzliche Terme wird die Interaktion zwischen den einzelnen Größen-Gruppen möglich. Das Verfahren erscheint vielversprechend, da es sowohl die freie Oberfläche als auch die verschiedenen großen Blasen

abbilden kann. Die derzeitige Implementierung, welche in die Software ANSYS CFX integriert wurde, erlaubt jedoch nur zweidimensionale Rechnungen und ist auf isotrope blockstrukturierte Gitter beschränkt.

Der Ansatz von Yan und Che kombiniert die Volume-of-Fluid Methode mit einem Zwei-Fluid-Modell. Das Modell unterteilt die Phasen in eine flüssige Phase, eine gasförmige Phase die große Grenzflächen beinhaltet (bspw. freie Wasseroberflächen) und eine monodisperse gasförmige Phase die kleine Grenzflächen beinhaltet (bspw. Blasen). Die Bewegung der ersten beiden Phasen wird mit der VoF-Methode modelliert. In Bereichen, in denen nur die flüssige Phase und die gasförmige Phase mit kleinen Grenzflächen vorhanden sind, wird das Zwei-Fluid-Modell angewendet. Wenn alle drei Phasen in einer Zelle vorhanden sind, wird ein für den Impulsaustausch ein für dieses Verfahren entwickelter Algorithmus („volume fraction redistribution“) angewandt. In ersten Tests zeigte sich, dass die Massenerhaltung in den Zonen, in denen alle drei Phasen vorhanden sind, nicht garantiert werden kann. Der Einfluss auf die Endergebnisse wird jedoch als gering eingeschätzt (Yan, Che, 2009). Alle bisherigen Tests wurden für zweidimensionale Testfälle mit blockstrukturierten Gittern durchgeführt.

Alle genannten Ansätze zeigen gute Übereinstimmung zu Experimenten aus dem Bereich der Blasensäulen. Für andere Anwendungsbereiche liegen noch keine Tests vor. Für die hier zu untersuchende Anwendung mit Lufteintrag durch einen frei fallendem Strahl, freie Wasseroberfläche und komplexe Geometrie müssten alle genannten Ansätze mit einem Lufteintragsmodell (vgl. z. B. Ma et al. 2010) erweitert und für dreidimensionale, komplexe unstrukturierte Gitter ausgelegt werden.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Numerik: Implementierung eines geeigneten Ansatzes in einen bestehenden CFD-Code. Test des Ansatzes an geeigneten Testbeispielen.

Labormodell: Test und Kalibrierung des verwendeten Messverfahren für Luftanteilmessung. Nach Fertigstellung des Labormodelles, durchführen von ersten Probemessungen. Mit Hilfe der Messungen erhofft man die physikalischen Verhältnisse (insbesondere den Lufteintrag im Fallschacht sowie den Blasen-transport) besser einschätzen zu können.

2014: Numerik: Vergleich der Ergebnisse zwischen numerischen Modell und Labormodell. Anschließende Verbesserung des numerischen Ansatzes.

Labormodell: Messreihen für verschiedene Schleusenfahrpläne, zur Untersuchung der Skalierungseffekte ist eventuell ein Ausschnittsmodell des Füllschachtes geplant.

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

5 Literatur

Chanson, H. (1999): *Air-water bubbly flows – Theory and applications*, Dissertationsschrift, School of Engineering, The University of Queensland, Australien.

Hänsch, S., Lucas, D., Krepper, E., & Höhne, T. (2012). *A multi-field two-fluid concept for transitions between different scales of interfacial structures*. International Journal of Multiphase Flow, 47, 171–182.

Krepper, E., Lucas, D., Frank, T., Prasser, H.-M., & Zwart, P. J. (2008). *The inhomogeneous MUSIG model for the simulation of polydispersed flows*. Nuclear Engineering and Design, 238(7), 1690–1702.

Silva, L. F. L. R., & Lage, P. L. C. (2011). *Development and implementation of a polydispersed multi-phase flow model in OpenFOAM*. Computers & Chemical Engineering, 35(12), 2653–2666.

Weller, H.G., Tabor G., Jasak, H., Furby, C. (1998): *A Tensorial Approach to CFD using Object Oriented Techniques*, Computers in Physics, Vol. 12 No. 6, pp 620–631.

Yan, K., & Che, D. (2010). *A coupled model for simulation of the gas–liquid two-phase flow with complex flow patterns*. International Journal of Multiphase Flow, 36(4), 333–348.

6 Veröffentlichungen

Thorenz, C. und Strybny, J. (2012): *On the numerical modelling of filling-emptying systems for locks*, 10th International Conference on Hydroinformatics

Koordinierte Bewirtschaftung von Staustufenketten – Modellierung und Betrieb**Netzplan-Nr.:** A39530370003**Projektleiter:** Dr.-Ing. P. Schmitt-Heiderich, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,
Referat Wasserbauwerke (W3)**E-Mail:** peter.schmitt-heiderich@baw.de**1 Problemdarstellung und Ziel****1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens**

Die lokale OW/Q-Regelung einer einzelnen Stauhaltung ist Stand der Technik und arbeitet in der Regel zuverlässig. Diese Regelung ist im Rahmen des FuE-Vorhabens "Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)" analysiert worden (vgl. Netzplan-Nr.: A39530310105). Dieses FuE-Vorhaben wurde Ende 2012 abgeschlossen und die Ergebnisse sind in den BAWMitteilungen 96 (BAW, 2012) dokumentiert.

Das vorliegende FuE-Projekt konzentriert sich auf eine Kette von Stauhaltungen, deren Betrieb gegenüber einer reinen lokalen Regelung dann verbessert werden kann, wenn die lokalen Regler in vorgegebenen Grenzen „richtig gesteuert“ werden. Der BAW ist kein allgemeingültiges Verfahren bekannt, mit dem Ketten von Staustufen koordiniert bewirtschaftet werden. Die in der Forschung diskutierten Ansätze der modellprädiktiven Regelung (MPR) scheiden aus, da eine größere Zahl zu koordinierender Stauhaltungen (> 4 Stauhaltungen) eine klassische Optimierung nur mit massivem Rechneinsatz zulässt (Mehrkernprozessoren oder PC-Cluster) und die Zielfindung aufgrund der hohen Dimensionalität der Optimierung nicht zwangsläufig gegeben ist (Arnold und Sawodny, 2008).

Die Verbesserung der Bewirtschaftung einer Stauhaltungskette erfordert Eingriffe und komplexe Berechnungsalgorithmen auch auf der Ebene einer lokalen OW/Q-Regelung. Daraus resultieren Fragen, wie aufwändig und sicher diese Algorithmen auf eine echtzeitfähige Zielplattform übertragen werden können. Weiterhin kann am Beispiel der Stauhaltungskette Mosel schon heute erkannt werden, wie mehrere lokale Regelungen zusammenwirken. Erkenntnisse aus dieser nicht koordinierten Bewirtschaftung mehrerer Stauhaltungen liefert Aufschluss über Unsicherheiten und Verbesserungsmöglichkeiten. Um diese unterschiedlichen Fragestellungen zu bearbeiten, unterscheidet das vorliegende FuE-Vorhaben 3 Themenkomplexe:

1. Entwicklung eines allgemeingültigen Ansatzes einer koordinierten Bewirtschaftung: In einer Stauhaltungskette fehlt der lokalen Regelung der "Blick" auf das Geschehen in benachbarten Stauhaltungen. Mit einer koordinierten Bewirtschaftung der Stauhaltungskette wird diese Informationslücke geschlossen. Die koordinierte Bewirtschaftung muss die lokale Regelung dahingehend erweitern, dass ein erwünschtes dynamisches Verhalten der Stauhaltungskette erreicht wird. Abflussvorgaben werden dabei von einem übergeordneten Koordinator gemacht und von den lokalen Reglern umgesetzt. Um eine optimale Regelung zu erreichen, muss der Koordinator die Auswirkungen seiner Vorgaben auf die Flusstrecke zeitlich vorhersagen können. Daher ist eine echtzeitfähige Modellierung der Regelstrecke (Stauhaltung) aufzubereiten, die einerseits schnell und robust auf einer Zielplattform ausgeführt wird und andererseits noch genau genug ist um die Realität hinreichend genau zu beschreiben.
2. Portierung des Reglercodes auf die Zielplattformen eines Industrie-PCs und einer Siemens SPS: Die entwickelten Algorithmen müssen für den Betrieb an einer Staustufe auf eine Zielplattform, z. B. eine Siemens SPS (speicherprogrammierbare Steuerung), übertragen werden. Dies wurde bisher über den Zwischenschritt eines Metacodes gelöst, was ein zeitaufwändiges und fehleranfälliges Umschreiben bestehender Algorithmen bedeutet. Hier wird die direkte Portierung aus Entwicklungsumgebung Matlab/Simulink auf die Zielplattformen in der WSV vorbereitet.
3. Auswertung der Betriebsdaten und Analyse der Wirkungen unsicherer Eingangsparameter: An der Mosel werden an allen automatisierten Staustufen Daten zum Automatikbetrieb in einer hohen zeitlichen Auflösung gespeichert. Eine auf die Belange der Schifffahrt abgestimmte vorausschauende Steuerung von Staustufen erfordert die Kenntnis der Zu- und Abflüsse. Diese werden nur selten direkt gemessen, sondern aus W-Q Beziehungen der Regelstrecke bzw. über Charakteristiken der Regelorgane aus den geodätischen Höhen berechnet und sind daher mit Ungenauigkeiten behaftet. Die Auswirkungen unsicherer Eingangsgrößen auf die Staustufenbewirtschaftung

tion werden analysiert und bewertet. Mögliche Fehlerquellen sollen dabei identifiziert und tolerierbare Fehlergrößen bestimmt werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die Entwicklung einer standardisierten und optimierten Bewirtschaftung von Stauhaltungsketten bietet zahlreiche Vorteile für die WSV, da die Standardisierung die Einrichtung einer koordinierten Bewirtschaftung erheblich vereinfacht und den Übertrag auf andere Stauketten ermöglicht. Vorteile einer koordinierten Bewirtschaftung sind eine Abflussvergleichmäßigung, ein Ausgleich von Defiziten, ein Ausgleich von Störungen, beispielsweise durch Pumpspeicherbetrieb oder Mischwassereinleitungen und eine bessere Beherrschung extremer Wetterereignisse. Im Hinblick auf eine zukünftige Zentralwarte, die eine Staustufenkette mit begrenztem personellem Aufwand führen soll, stellt eine koordinierte Bewirtschaftung die dafür notwendigen Informationen bereit,

In der WSV wird häufig auf die weit verbreiteten SPSen der Bauarten S5 und S7 der Firma Siemens zurückgegriffen. Durch die direkte Portierung des Regelungscode auf die Zielplattform einer Siemens SPS wird die Implementierung beschleunigt und die Wartung durch WSV Mitarbeiter möglich. "Hardware in the Loop (HIL)" ermöglicht der BAW die Prüfung des umgesetzten Reglercodes durch ein Zusammenspiel der SPS und einem auf einem PC laufenden Modell der Regelstrecke. Dies trägt maßgeblich zur Qualitätssicherung bei.

Die Analyse der Betriebsdaten aus der ASR ermöglicht die sukzessive Verbesserung des Wirkbetriebes. Hierin unterstützt die BAW die WSV seit Inbetriebnahme der lokalen Regelung an der Moselstaustufe Detzem. Die bisher durchgeführten lokalen Betrachtungen werden nun auf die Betrachtung der Stauhaltungskette erweitert.

1.3 Untersuchungsziel

Die Ziele des Forschungsvorhabens lassen sich wie folgt formulieren:

- Einrichtung und effektive Parametrisierung einer koordinierten Bewirtschaftung an Stauhaltungsketten. Hierfür sind die Algorithmen für die Bewirtschaftung allgemeingültig zu formulieren.
- Erarbeitung von vertieften Kenntnissen der Modellierung der Regelstrecke in Zusammenspiel mit Regelalgorithmen.
- Qualitätsgesicherte Nutzung verschiedener Zielplattformen für den Reglercode. Insbesondere ist ein Vorgehen zur Reglerportierung von PC auf eine Siemens SPS zu entwickeln, da diese Zielplattform in der WSV als Standard SPS eingesetzt ist.
- Analyse des Wirkbetriebes einer Stauhaltungskette mit dem Ziel, die Parametrisierung zu optimieren.
- Aufzeigen von Lösungen, mit denen die Unsicherheiten im Betrieb einer Stauhaltungskette verringert werden können.

2 Untersuchungsmethoden

Allgemeingültiger Ansatz einer koordinierten Bewirtschaftung

Die Umsetzung der koordinierten Bewirtschaftung ist an der Mosel und am Neckar vorgesehen. Die Bearbeitung erfordert ein vertieftes Wissen über partielle Differentialgleichungen im Zusammenspiel mit der Regelung und der Optimierung gekoppelter Systeme. Die Regelungstechnik spricht bei Regelstrecken, deren Verhalten durch partielle Differentialgleichungen beschrieben wird, von Strecken mit verteilten Parametern. Die Regelung von Strecken mit verteilten Parametern ist ein aktuelles Forschungsgebiet der Universitäten. Die BAW ist aufgrund begrenzter Personalkapazitäten nicht in der Lage, diese Fragestellungen in der notwendigen Tiefe und Schnelligkeit zu bearbeiten. Das dafür notwendige Spezialwissen ist in der BAW nicht vorhanden, weswegen die Universität Stuttgart (Prof. Sawodny) über einen FuE-Kooperationsvertrag mit der Entwicklung eines allgemeingültigen Koordinators beauftragt wurde.

Portierung von Reglercode auf den Zielplattformen Industrie-PC und Siemens SPS

Eine Siemens SPS wird hard- und softwaremäßig an die Entwicklungsumgebung Matlab/Simulink angebunden. Anschließend müssen die Möglichkeiten einer Portierung in zahlreichen Tests mit unterschied-

lich komplexen Regelalgorithmen geprüft werden. Dazu wird Reglercode über die Methoden SIL (Software in the Loop) und HIL getestet.

Auswertung von Betriebsdaten und Analyse der Auswirkungen unsicherer Eingangsparameter

In einem ersten Schritt sind die Betriebsdaten in Matlab bereitzustellen. Da alle Daten einen Zeitbezug haben, werden diese als Zeitreihenobjekte aufbereitet. Die Daten werden statistisch in Raum (Streckenbezug) und Zeit ausgewertet. Für ausgewählte Zeitspannen werden die Reglerausgänge aus den Betriebsdaten mit den Strecken- und Bauwerksmodellen der BAW gekoppelt oder mit den rechnerisch ermittelten Reglerausgängen verglichen. Hierdurch soll ein vertieftes Verständnis über die Unsicherheiten der Abflussermittlung erhalten und deren Wirkung auf die Regelung erkannt werden.

3 Ergebnisse

Das FuE-Vorhaben wurde Ende 2012 nach Abschluss des FuE-Vorhabens Vorhabens "Optimierungsverfahren für die Parametrisierung von Reglern der automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung (ASR)" begonnen. Ergebnisse liegen z. Z. noch nicht vor.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Arbeiten der Universität Stuttgart zum allgemeingültigen Ansatz einer koordinierten Bewirtschaftung: 2013-2015:

- Modellinversion: Direkte Ableitung der Regelungsvorschrift aus den Saint-Venantschen Gleichungen (Modellinversion) mit differential-algebraischen Methoden. Die Komponenten des Lösungsansatzes zur Vorsteuerung sind zu entwickeln.
- Implementierung und Test mit Sensitivitätsuntersuchungen.
- Das Entwurfsverfahren ist allgemeingültig zu formulieren, damit es als "Standardvorgehensweise" einer koordinierten Bewirtschaftung einer Staukette genutzt werden kann.
- Dokumentation.

Arbeiten der BAW zur Reglerportierung und Auswertung der Betriebsdaten der Moselstauhaltungen: 2013-2014:

- Hard- und softwaremäßige Anbindung einer Siemens SPS an die Entwicklungsumgebung Matlab/Simulink und Einarbeitung in die Portierung.
- Test der Portierung mit SIL und HIL.
- Modellsteuerung eines physikalischen Hallenmodells mit der Portierung von Reglercode auf eine Siemens SPS.
- Aufbereitung der Moselbetriebsdaten als Zeitreihenobjekte.
- statistische Auswertung der Betriebsdaten der automatisierten Moselstauhaltungen.
- Vergleichende Berechnungen zur Evaluation der Betriebsdaten.

2015

- Dokumentation der Untersuchungen zur Portierung.
- Umsetzung der Portierung der lokalen Regler am Neckar und Tests mit einer konkreten Umsetzung.
- Vorschlag zur besseren Bestimmung der unsicheren Abflussgrößen.
- Bericht

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2015.

5 Literatur

Arnold, E. und Sawodny, O. (2008): Parametrisierung von Reglern zur automatisierten Abfluss- und Stauzielregelung. Literaturstudie. Institut f. Systemdynamik der Universität Stuttgart, 14. November 2008

BAWMitteilungen (2012): Automatisierte Abfluss- und Stauzielregelung (ASR). ISSN 2190-9199; Heft 96; November 2012;

Integration mehrdimensionaler Modelle in die GBBSoft

Netzplan-Nr.: A39530470004

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

E-Mail: Svetlana.Doychev@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die bestehende GBB-Software berechnet die schiffserzeugten Belastungen aus dem Primärwellenfeld, den Sekundärwellen und dem Schraubenstrahl. Im Bezug auf die Schiffsförmigkeit und die Schiffsgeschwindigkeit basieren die dafür entwickelten Algorithmen auf worst-case-Szenarien. Das Ergebnis liegt somit zwar immer auf der sicheren Seite, ist aber für speziellen Schiffstypen, z.B. mit schlanken Bug- und Heckformen, ungenau. Durch die Einbindung eines mehrdimensionalen Modells, das die Schiffsgometrie berücksichtigt und flexibel bezüglich der Schiffsgeschwindigkeit ist, wird ein genaueres und detailliertes Ergebnis erwartet. Ein weiterer Vorteil des mehrdimensionalen Modells besteht in der freien Vorgabe der Sohltopografie, was die Berechnung für Kanäle und Flüsse mit nichtregulären Querschnitten ermöglicht.

1.2 Bedeutung für die WSV

Gegenüber der aktuellen Version GBBSoft erlaubt das zweidimensionale Modell genauere Aussagen über die Wellenhöhen und Geschwindigkeiten, insbesondere bei der Fahrt in Gewässern mit einer kleinen Böschungseigung. Des Weiteren wird die Berechnung der Uferbelastungen in nichtregulären Kanal- und Flussquerschnitten möglich. Da die Bug- und Heckform eine entscheidende Rolle bei der Bildung des Wellensystems spielen, besteht ein zusätzlicher Vorteil des Modells darin, dass die Schiffsgometrie mit in die Berechnung einfließt. Der wirtschaftliche Nutzen der erweiterten Version besteht darin, dass mit genaueren Vorhersagen der Wellenhöhen und der Strömungsgeschwindigkeiten die erforderliche Steingröße nicht mehr überschätzt wird und somit die Materialkosten reduziert werden.

1.3 Untersuchungsziel

Es soll ein numerisches Programm erstellt werden, das in Abhängigkeit vom Kanalquerschnitt, von der Schiffsgometrie und der Schiffsgeschwindigkeit das Wellenbild eines stationär fahrenden Schiffes berechnet. Dabei werden der Grenzschichteinfluss am Schiff, der Sohlreibungswiderstand und die Schwimmbedingung am Schiff berücksichtigt. Das Endziel des Vorhabens ist eine neue Version der GBBSoft, die die Möglichkeit bietet schiffserzeugte Wellen und deren Auf- und Rücklauf am Ufer auf einem handelsüblichen PC innerhalb weniger Minuten numerisch zu simulieren und daraus die schiffsinduzierten Uferbelastungen zu ermitteln.

2 Untersuchungsmethoden

Das Modell nutzt für die Wellenberechnung den potentialtheoretischen Ansatz, bei dem das Geschwindigkeitsfeld als Gradient eines Geschwindigkeitspotenzials dargestellt wird. In Übereinstimmung mit der Schlankkörpertheorie wird anstelle vom Schiff eine Verdrängungs-randbedingung gesetzt, die von der Schiffsgometrie und der Schiffsgeschwindigkeit abhängt.

3 Ergebnisse

Die Arbeit der ersten Halbjahres 2012 konzentrierte sich auf die Validierung der Ergebnisse. Besondere Schwierigkeit bestand darin das Programm so aufzubereiten, dass es auch in der Nähe der kritischen Schiffsgeschwindigkeit zuverlässige Ergebnisse liefert. Dazu musste die Schiffsrundbedingung neu hergeleitet werden, um die zur Vereinfachung weggelassenen Terme im Modell aufzunehmen.

Die untenstehende Abbildung zeigt den Vergleich zwischen den numerisch vorhergesagten und den in der Natur gemessenen Wellenhöhen bei einer außermittigen Fahrt im WDK-Kanal. Der Kanalquerschnitt ist trapezförmig mit Kanalbreite von 52m, der Wassertiefe von 4m und der Böschungseigung von 1:3.

Die Schiffsabmessungen waren 105m x 11m x 2,8m. Die Wellenhöhen am Ufer werden gut von der Simulation vorhergesagt. Die maximale Abweichung beträgt 5cm.

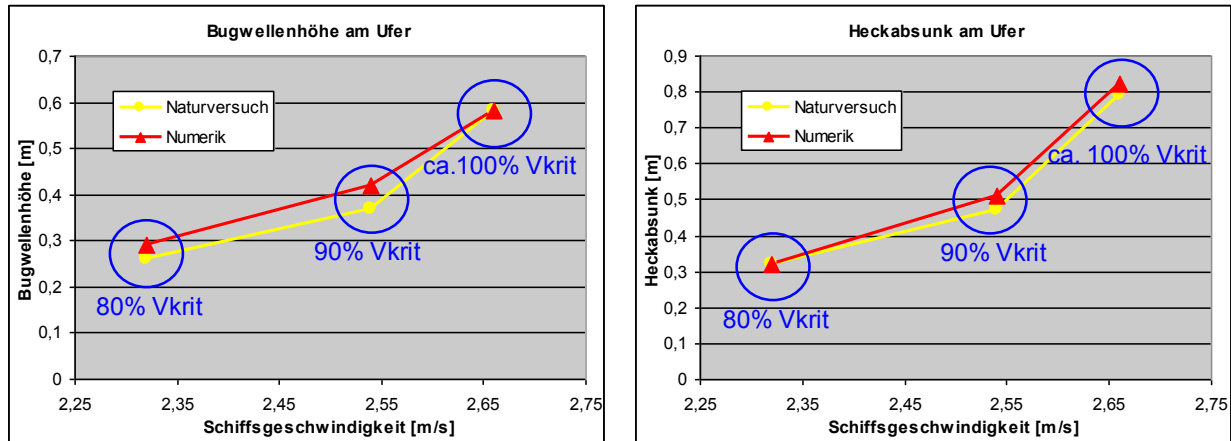


Bild 1: Vergleich zwischen den gemessenen und den simulierten Wellenhöhen am Ufer

Im zweiten Halbjahr 2012 wurde eine Schiffsdatenbank, bestehend aus zehn Schiffen, erstellt und ins das Programm eingebunden. Parallel dazu wurde eine Programmbeschreibung angefertigt.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Zurzeit wird das Programm als ein Stand-alone Tool für diverse Studien benutzt. Nach der vollständigen Validierung und Erweiterung der Schiffsdatenbank soll es in die bestehende GBBSOft eingebaut werden. Die Einbindung übernimmt die Firma SWIFT Engineering GmbH, die schon die GBBSOft erstellt hat. Des Weiteren ist geplant Fallstudien mit dem Programm durchzuführen, die die unterschiedlichen Gewässerquerschnitte und Schiffsformen miteinander vergleichen und sie bezüglich schiffserzeugter Uferbelastungen beurteilen.

Das geplante Ende des Vorhabens ist Ende 2013.

- Erstes Halbjahr 2013:
 - Validierung und Verbesserung des Programms in einem iterativen Vorgang, d.h. Vergleich mit experimentellen Ergebnissen, Definition der Schwächen des Programms und mögliche Problembhebung
 - Durchführung von Fallstudien und Veröffentlichung der Ergebnisse in einer Fachzeitschrift
 - Vorstellung der Ergebnisse der Fallstudien auf der „International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water“
- Zweites Halbjahr 2013:
 - Definition der Schnittstellen zur GBBSOft
 - Anpassung des Programms an die Benutzereingabedaten der GBBSOft
 - Erstellung Standardausgaben
 - Einbindung der Software in die GBBSOft

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2013.

5 Literatur

Xue-Nong Chen, 1999, Hydrodynamics of Wave-Making in Shallow Water, Dissertation, Universität Stuttgart, Shaker Verlag

Untersuchungen zur Sohl- und Uferbeanspruchung aus Schlagflächenantrieben

Netzplan-Nr.: A39530470005

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

E-Mail: bernhard.soenngen@baw.de

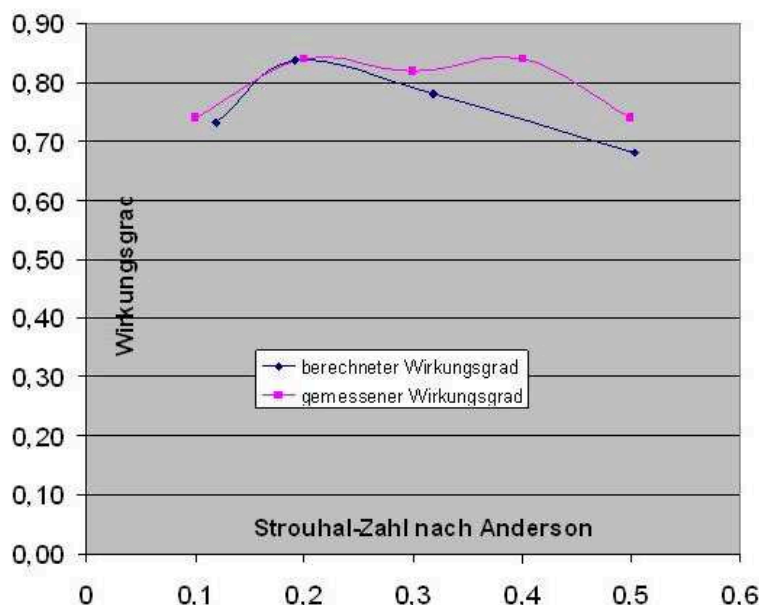
1 Problemstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Schiffspropeller verursachen insbesondere bei kleinen Flottwassertiefen große Sohlbeanspruchungen, die zu Auskolkungen bis hin zur Resuspension von Sohlmaterial führen können. Dies liegt u. a. an der Ausbreitungscharakteristik des drallbehafteten Propellerstrahls, der eine große Erhaltungstendenz aufweist. Es stellt sich deshalb die Frage, ob es alternative Antriebssysteme von Binnenschiffen zu heute üblichen Schiffspropellern gibt, die bei gleichem Schub geringere Sohlbeanspruchungen verursachen und ggf. sogar günstigere Wirkungsgrade aufweisen, um Treibstoffkosten einzusparen. Eine mögliche alternative Antriebsform ist die Schlagfläche. Hierbei muss man sich eine auf- und ab bzw. seitwärts schwingende Fläche vorstellen wie bei der Schwanzflosse eines Delphins oder eines Fisches. Erste Berechnungen und eine umfangreiche Literaturrecherche zeigen, dass Schlagflächenantriebe höhere Wirkungsgrade aufweisen können als herkömmliche Binnenschiffspropeller und voraussichtlich wesentlich geringere Sohlbelastungen verursachen. Diese Aussagen sollen im Rahmen des Vorhabens durch experimentelle Untersuchungen mit einem Schlagflächenroboter gestützt werden.

1.2 Bedeutung für die WSV

Durch den Einsatz von Schiffsschrauben als Standardantrieb von Wasserfahrzeugen können Fundamente von Wasserbauwerken unterspült, Ufer beschädigt und Gewässerböden erodiert werden. Weiterhin leiden Pflanzen und Tier-Populationen in den Gewässern. Alternative Antriebe, wie z.B. Schlagflächenantriebe, können dazu beitragen, die propulsionsbedingten Belastungen zu begrenzen. Weiterhin könnten sie bekannte Nachteile von Schraubenantrieben reduzieren, die bei wechselnden Einsatzbedingungen wie unterschiedliche Wassertiefen, Strömungsgeschwindigkeiten, Beladungszuständen, Fahrt als Einzelfahrzeug oder im Verband, Propellerwirkungsgrad aufweisen, die im Durchschnitt bei 0,3 – 0,5 liegen, obwohl theoretisch Werte bis etwa 0,6 erreichbar wären..



Schlagflächenantriebe haben nach Literaturrecherchen diesbezüglich Vorteile, wenn die Hubbewegungen auf die Fahrtgeschwindigkeit adaptiert werden. Dies zeigen z. B. Untersuchungen von Anderson und eigene Ansätze auf Basis der Tragflügeltheorie, die Wirkungsgrade bis ca. 0,8 für erreichbar halten, siehe

oben stehende Grafik, in der ein Versuch von Anderson durch Modellrechnungen nachvollzogen wurde. Der Wirkungsgrad ist dabei als Funktion der Strouhal-Zahl angegeben, die zum Verhältnis von Schiffs- zu Hubgeschwindigkeit proportional ist

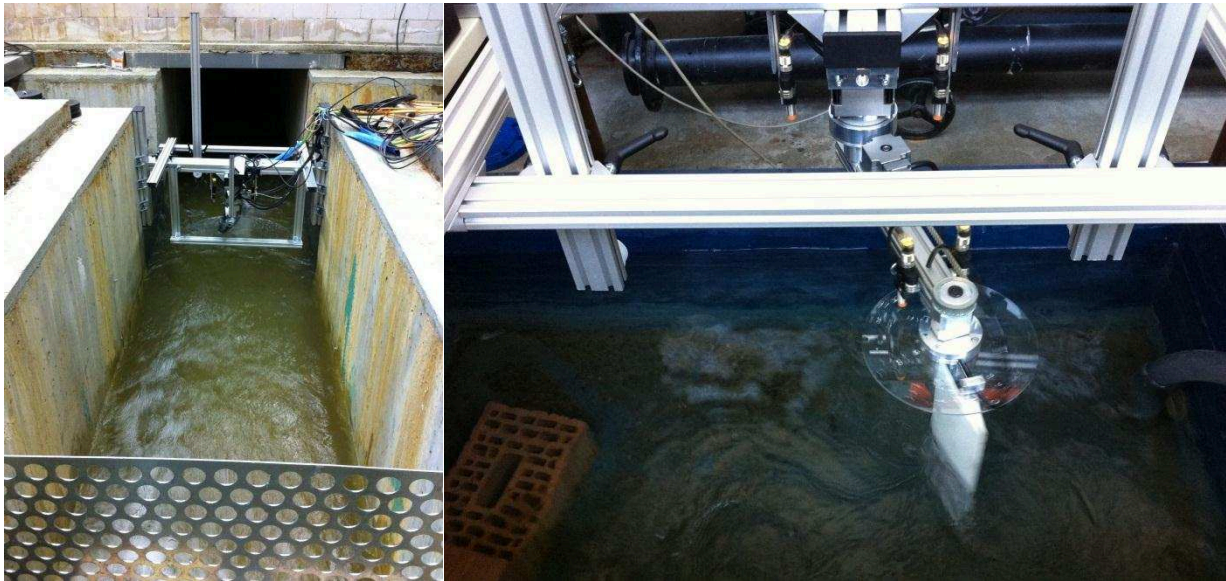
1.3 Untersuchungsziel

Im Rahmen dieses Vorhabens werden experimentelle Untersuchungen zum Wirkungsgrad und zur Sohlbeanspruchung aus einem Schlagflächenantrieb durchgeführt. Die Ergebnisse der Modelluntersuchungen sollen in einen F&E-Antrag münden, mit dem externe Forschungsmittel erschlossen werden. Das BAW-F&E-Vorhaben dient der Vorbereitung dieses Antrags.

2 Untersuchungsmethoden

Zur Durchführung der Experimente wird am Institut für Wasserbau der Hochschule für Wirtschaft und Technik (früher FH Karlsruhe) mit Unterstützung des Ingenieurbüros Kauppert ein Versuchstand aufgebaut, siehe linke unten stehende Grafik. Die Versuche werden quasistationär durchgeführt, d. h. das Antriebsorgan ist ortsfest installiert und wird von vorne angeströmt. Die Strömungsgeschwindigkeit entspricht dabei der Schiffsgeschwindigkeit.

Der Schlagflächenantrieb besteht aus zwei Drehhebeln, die die Hub- (analog zum Schlagen einer Flosse) und Pitchbewegung (analog zur Drehung der Flosse während der Schlagbewegung) nachbilden, wobei die Schwingungsperiode T , die maximalen Hub- (Φ_{Hmax}) und Pitchwinkel (Φ_{Pmax}) sowie die Phasenverschiebung (Ψ) zwischen Hub- und Pitchbewegung frei ansteuerbar sind. Am zweiten Hebel ist die Schlagfläche (Flosse) angebracht, siehe folgende rechte Abbildung.



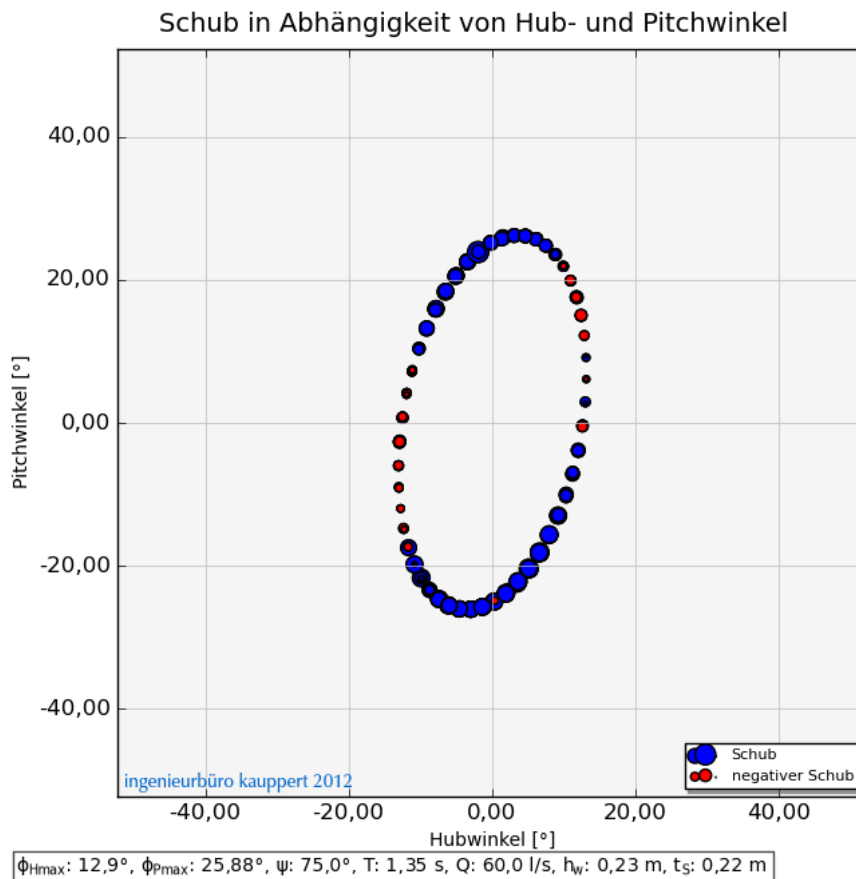
Die Flosse kann bis zu 0.3 m ins Wasser eintauchen. Dadurch kann das gesamte Spektrum denkbarer Streckungen der Schlagfläche variiert werden. Alle Drehkräfte und Drehgeschwindigkeiten sowie der Schub werden gemessen, sodass daraus der mechanische Wirkungsgrad als Verhältnis von Nutz- zu Gesamtleistung berechenbar wird. Es besteht weiterhin die Möglichkeit, den hinteren Teil der Flosse unangesteuert zu lassen. Seine Position bezüglich des Vorderteils würde sich dann durch eine Drehfeder aus der Bewegung heraus einstellen, was einer natürlichen Bewegung mancher Fischarten entspricht. Die Messungen und Auswertungen werden im Rahmen von Hilfsassistententätigkeiten sowie Bachelor- und Studienarbeiten bei Prof. Eisenhauer durchgeführt.

3 Ergebnisse

Bis Ende 2012 wurde der Schlagflächenroboter ausgelegt (BAW), konstruiert und gebaut (Kauppert) und am Inst. für Wasserbau der Hochschule Technik und Wirtschaft, Karlsruhe (Prof. Eisenhauer) in Betrieb

genommen. Erste Berechnungen zum Wirkungsgrad η bei kleinen Schlagflächenstreckungen, wie sie aus versuchstechnischen Gründen gewählt wurden und wie sie voraussichtlich für Hilfsantriebe infrage kommen, wurden vom Antragsteller durchgeführt (Prognose $\eta \approx 0,5$) und mit Literaturangaben verglichen ($\eta \approx 0,4$). Die fachwissenschaftlichen Grundlagen der Wirkungsgradprognose und der Aufbau des Versuchstandes wurden in einer Bachelorarbeit (Weiler) dokumentiert.

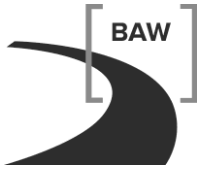
Der zeitliche Verlauf des erzielbaren Schubs hängt in hohem Maße von der Koordination von Hub- und Pitchbewegung sowie von der zugehörigen Phasenverschiebung ab. Ein Beispiel zeigt das folgende Diagramm, auf dem der gemessene Schub über dem Hub- und Pitchwinkel aufgetragen ist, wobei mehrere Zyklen der Bewegung übereinander dargestellt sind. Es zeigt sich, dass es Phasen mit negativem Schub gibt. Die für die durchgeführten Experimente zum Vergleich mit Messergebnissen gewählten sinusförmigen Ganglinien der v.g. Winkel ist somit unter Versuchsbedingungen nicht optimal und vor allem abhängig vom Verhältnis der Hubgeschwindigkeit zur Schiffsgeschwindigkeit. Die zugehörigen optimalen Bewegungsmuster zur Vermeidung von Phasen mit negativem Schub und zur Maximierung des Wirkungsgrades sollen in einem nächsten Schritt untersucht werden.



4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Das Arbeitsprogramm unterteilt sich in zwei Phasen. In der ersten Phase wurde der Versuchstand aufgebaut und die Steuerungssoftware implementiert. Danach wurden die Sensoren des Schlagflächenroboters kalibriert. Anschließend wurden Messungen mit typischen Hub- und Pitchwinkeln sowie Phasendifferenzen aus Literaturdaten durchgeführt. Derzeit (Anfang 2013) erfolgt die messtechnische Minimierung von Zwängungsspannungen zur Verbesserung der Schubmessung. Anschließend ist der Vergleich mit theoretischen Untersuchungen des Antragstellers und Messdaten aus der Literatur vorgesehen. Die zweite Phase zwei konzentriert sich auf Belastungen der Sohle. Anschließend wird darauf aufbauend ein F&E-Antrag formuliert (Ende 2013). Danach endet das BAW-F&E-Vorhaben.

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2013.



5 Literatur

- Neil Bose, Marine Powering Prediction and Propulsors,
G. Iosilevskii, D. Weihsdoi: Speed limits on swimming of fishes and cetaceans, J. R. Soc. Interface 2008
5
- J. M. Anderson, K. Streitlien, D. S. Barrett, M. S. Triantafyllou, Oscillating foils of high propulsive efficiency, J. Fluid Mech. (1998), vol. 360
- C. Weiler, Der Schwanzflossenantrieb als alternativer Antrieb von Booten, Bachelor-Thesis, Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft, 2012

Numerische Modellierung von Transportkörpern (Dünen) in Binnenwasserstraßen

Netzplan-Nr.: A39530570001

Projektleiterin: A. Goll, Abteilung Wasserbau im Binnenbereich,
Refeat Numerische Verfahren im Wasserbau (W5)

E-Mail: annalena.goll@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Die Form des Gewässerbodens bestimmt nicht nur den hydraulischen Widerstand, Sedimenttransport, Morphodynamik und die Habitatentwicklung. Sie stellt die Schifffahrt mitunter vor große Probleme: Obwohl sowohl Sedimentcharakteristiken, Flussgeometrie und Abfluss bekannt sind, lässt sich der zu erwartende Sedimenttransport und damit die Wassertiefe nur ungenau bestimmen. Die Entwicklung von Transportkörpern wie Dünen und Bänken trägt hierbei eine nicht unerhebliche Teilschuld (ASCE, 2002).

Die Wassertiefen der Schifffahrtsstraßen genau zu prognostizieren bzw. zu beeinflussen ist also unverzichtbar. Dies ist einer der Gründe, warum Engelund and Fredsøe (1982) und Southard (1991) Dünen als wichtigste Sohlform in der praktischen Ingenieurstätigkeit bezeichnen.

Zumeist wird in der numerischen Modellierung mittels geschätzter oder gemessener Dünenlänge und -höhe eine angepasste Sohlrauheit berechnet, welche den Einfluss der Transportkörper auf die Strömung abbilden soll. Die Sohlrauheit kann z.B. nach van Rijn (1993) kumulativ aus der Kornrauheit und der Formrauheit von Riffeln und Dünen berechnet werden. Damit wird eine globale Anpassung der Sohlrauheit vorgenommen. Der sich zeitlich und örtlich ändernden Geometrie der Dünen wird damit gar nicht oder nur ungenügend Rechnung getragen.

Der Einfluss der Dünen kann erheblich sein: Nach den Abschätzungen von van Rijn ergibt sich ein Formrauheitswert von 70 mm für 1 m lange und 10 cm hohe Dünen. Treten diese Dünen bei einer Sandsohle mit einem mittleren Korndurchmesser von 1 mm auf, so berechnet sich die Kornrauheit nur zu 3 mm. Die Dünen erhöhen die Gesamtrauheit in diesem Fall ungefähr um einen Faktor von 24. Eine genaue Prognose der Dünen und ihrer Veränderung infolge Abfluss aber auch infolge Baumaßnahmen ist für die Genauigkeit von numerischen Modellierungen daher unerlässlich.

Verschiedene jüngere Publikationen berichten von der expliziten Modellierung von Dünen, z.B. Rütter et al (2008) und Nabi (2010). Dabei kommen dreidimensionale RANS-Modelle oder auch LES-Modelle zum Einsatz. In einer Diplomarbeit (Goll, 2011) an der BAW konnte gezeigt werden, dass es prinzipiell mit dem in der BAW eingesetzten dreidimensionalen Feststofftransportmodell (FT-Modell) Telemac / Sisyphé möglich ist, die Dünenentstehung und ihre Propagation zu simulieren.

1.2 Bedeutung für die WSV

Eine wesentliche Aufgabe der Abteilung ist die möglichst genaue Berechnung und Vorhersage der morphologischen Entwicklungen infolge von Bau-, Regelungs-, Instandhaltungs- und Geschiebemanagementmaßnahmen an Bundeswasserstraßen für die Beratung der planenden und ausführenden Instanzen der WSV.

Eine kontinuierliche Verbesserung der in der BAW eingesetzten Modelle führt zu einer steten Optimierung und einem erweiterten Anwendungsspektrum der Modelle für die Projektarbeit. Langfristig sollen mit Hilfe von numerischen Modellen Dünenänderungen infolge von baulichen oder geschiebewirtschaftlichen Änderungen an den Wasserstraßen prognostiziert werden können. Diese Ergebnisse sind entscheidend für eine möglichst genaue Prognose und Beeinflussung der Wassertiefen.

1.3 Untersuchungsziel

Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist es, die Möglichkeiten der numerischen Modellierung von Transportkörpern / Dünen mittels FT-Modell zu untersuchen. Ausgehend von der These, dass Dünen mit numerischen dreidimensionalen Verfahren direkt (also nicht mit Hilfe von Parametrisierungen) simuliert werden können, sollen die Möglichkeiten und Grenzen zur Dünenprognose mit Hilfe dieser Verfahren abgesteckt werden. Die Validierung der Ergebnisse soll an Messergebnissen aus in der BAW laufenden Rinnenversuchen mit Dünen erfolgen. Die Anwendung der Dünenprognose soll dann an realen Flussmodellen geprüft und ggf. auf die Projektarbeit übertragen werden.

2 Untersuchungsmethoden

Da die Physik der Dünen noch nicht vollständig verstanden ist, sind vergleichende Untersuchungen im Labor unabdingbar. In einer Laborrinne („blaue Rinne“) der BAW finden derzeit Untersuchungsreihen zu Dünen statt. Dabei handelt es sich um Versuche mit bewegter Sohle und verschiedenen Einbauten, und um rein hydraulische Messungen über natürlich geformten, fixierten, unbeweglichen Dünen. Numerisch begleitet können durch diese Experimente sowohl hydrodynamische als auch morphodynamische Modelle validiert werden. Durch paralleles Arbeiten an Rinne und numerischem Modell ergeben sich Synergieeffekte und es ist möglich, Messprogramme an die Anforderungen der Numerik anzupassen.

Für die explizite Modellierung von Dünen mittels FT-Modell müssen zunächst die Parameter detektiert werden die Dünenentstehung, Dünenhöhe und Dünenlänge bestimmen. Die Wirkung dieser Parameter muss systematisch untersucht und verstanden werden. Ggf. sind weitere Ansätze zu implementieren und zu testen (z.B. gravitationeller Transport, Turbulenzmodellierung, nicht-hydrostatischer Druckansatz). Da Dünen eine sehr komplexe Hydrodynamik erzeugen, spielen die Auflösung des Gitternetzes sowohl horizontal als auch vertikal, sowie die Turbulenz eine große Rolle. Diesem Umstand sind durch die Wahl von verschiedenen Turbulenzmodellen sowie durch unterschiedliche räumliche und zeitliche Auflösungen bis hin zu LES-Simulationen Rechnung zu tragen. Die Messungen über der fixierten Dünensohle bieten hier eine sehr gute Datengrundlage zur Validierung. Eine Abschätzung der Prognosefähigkeit der Dünenmodellierung kann mit Hilfe von Zuverlässigkeitsmethoden erfolgen.

Es wird hauptsächlich das Verfahren Telemac / Sisyphus der EDF (Software) zum Einsatz kommen. Daneben sind ggf. Vergleichsrechnungen mit anderen Verfahren (z.B. Delft3D, SSIIM ...) vorgesehen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sollen in einem projektrelevanten Anwendungsfall eingesetzt werden. Wenn möglich, soll dabei eine direkte Dünenmodellierung durchgeführt werden. Andernfalls sind Parametrisierungen abzuleiten, die eine verbesserte Berücksichtigung von Dünen ermöglichen.

3 Ergebnisse

Die aktuellsten Ergebnisse wurden Ende des Jahres 2012 auf zwei Konferenzen (Riverflow 2012, Costa Rica und XIXth Telemac Users Club 2012, Oxford) präsentiert.

Es konnte gezeigt werden dass ein explizites Modellieren von Dünen und ihren Bewegungen mit Telemac3D und Sisyphus möglich ist. Die korrekte Dünenform wird jedoch durch verschiedene Faktoren beeinflusst: Geschiebetransportformel, Formeln für den gravitationellen Transport, morphodynamischer Zeitschritt sowie hydrodynamische Parameter. Eine neue Transportformel nach Yang und Lim (2003) sowie eine neue Formel zur Beschreibung der Ablenkung (deviation) im gravitationellen Transport nach Apsley und Stansby (2008) wurden implementiert und getestet. Beide Formeln zeigen gute Ergebnisse für die Dünenmodellierung (Bild 1).

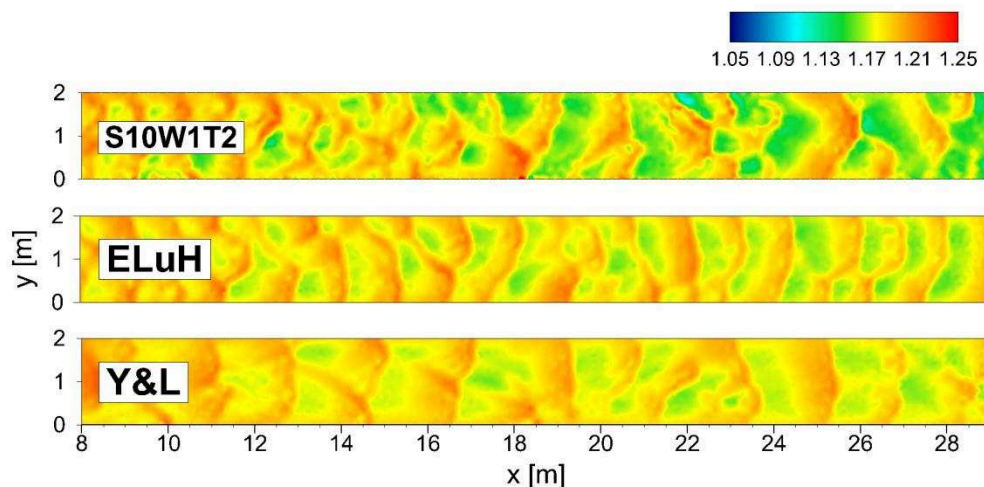


Bild 1: Dünenmodelierungen im Vergleich zu Modellversuch S10W1T2 nach 18h Versuchszeit mit Slope Effect Formel nach Koch & Flokstra und Deviation Formel nach Apsley & Stansby, ELuH = Transportformel nach Engelund & Hansen, Y&L = Transportformel nach Yang & Lim

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2012-2014

- Kalibrierung der numerischen Untersuchungen mit den Messungen an einer Laborrinne („blaue Rinne“) zu den Dünenuntersuchungen
- Begleitung der Dünenuntersuchungen an der Systemrinne für die verschiedenen Varianten (Teilbefestigung, Bühnen, Bühnendurchrisse, ...)
- Systematische Untersuchung der für die Dünenentstehung, Dünenhöhe und Dünenlänge relevanten Parameter
- Anwendung und ggf. Erweiterung oder Ergänzung von Ansätzen zur Berechnung des gravitationellen Transports / der Schubspannung / der Turbulenz / des nicht-hydrostatischen Druckansatzes
- Vergleich von unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Auflösung
- Regelmäßige Vorstellung der Ergebnisse auf Konferenzen

2012-2013

- Validierung der Hydrodynamik anhand von natürlich geformten Dünen aus dem Laborexperiment
- Vergleiche mit anderen numerischen FT-Verfahren

2013-2014

- Abschätzung der Prognosefähigkeit für die Dünenmodellierung unter Anwendung von Zuverlässigkeitsmethoden
- Vorteile und Möglichkeiten der LES-Modellierung abschätzen und ggf. einsetzen
- Projektrelevanter Anwendungsfall
- Bericht, ggf. Promotionsarbeit
- Journal paper

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

5 Literatur

- Apsley, D. D., Stansby, P. K. (2008): Bed-load sediment transport on large slopes: Model formulation and implementation within a RANS solver. *Journal of Hydraulic Engineering*, Heft 134, S. 1440-1451.
- ASCE, (2002): Flow and Transport over dunes. *Journal of Hydraulic Engineering*, Band 128, Heft 8, S.726-728.
- Engelund, F., Fredsøe, J. (1982): Sediment ripples and dunes. *Annual Review of Fluid Mechanics*, Heft 14, S. 13-37.
- Goll, A. (2011): Numerische Modellierung von Geschiebetransport durch Dünen. Diplomarbeit, BAW und Universität Stuttgart.
- Nabi, M. (2010): Computational modelling of three dimensional bedform evolution. *Proceedings of River Flow 2010*, TU Braunschweig.
- van Rijn, L.C. (1993), *Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas: Part 1*. 1. Auflage, Aqua Publications, Amsterdam.
- Ruether, N., Olsen, N., Eilertsen, R. (2008): 3D modeling of flow and sediment transport over natural dunes. *Proceedings of 4th International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2008, Cesme/Izmir, Turkey*.
- Southard, J.B. (1991): Experimental determination of bed-form stability. *Annual Review of Earth and Planetary Science*. Heft 19, S.423-455.
- Yang, S.-Q., Lim, S.-Y. (2003): Total load transport formula for flow in alluvial channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, Heft 129, S. 68-72.

6 Veröffentlichungen

- Goll, A., Kopmann, R. (2012). Numerical simulations of groyne influenced dunes. *Proceedings of River Flow 2012, San José, Costa Rica*. CRC Press.
- Goll, A., Kopmann, R. (2012). Dune simulation with TELEMAC3D and SISYPHE: A parameter study. *Proceedings of the 19th Telemac and Mascaret User Club, 17-19 October 2012, HRW*.

Störung des Baugrundes durch Kampfmittelsondierungen

Netzplan-Nr.: A39550170362

Projektleiterin: Dipl.-Geol. A. Heeling, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,
Referat Geotechnik Nord (K1)

E-Mail: anne.heeling@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Im Vorwege einer Baumaßnahme ist die Kampfmittelfreiheit im Baufeld sicherzustellen. Die zur Kampfmittelsuche eingesetzten, überwiegend magnetischen und elektromagnetischen Sondierverfahren arbeiten selbst zwar zerstörungsfrei, erfordern aber häufig Aufgrabungen oder Bohrungen. Bei Tiefensondierungen wird die Messsonde dann vom Bohrloch aus eingesetzt. Das Bohrverfahren, das Erkundungsraster und die Erkundungstiefe werden vom Kampfmitteldienst (KRD) des jeweiligen Bundeslandes auf Grundlage länderspezifischer Verordnungen und Verwaltungsvorschriften und auch einzelfallbezogen nach eigenem Ermessen festgelegt. Für den Bund gelten zudem eigene Vorgaben.

Hier kommt es zu einem Interessenkonflikt zwischen dem KRD einerseits und dem Bauherrn bzw. dessen Baugrundgutachter andererseits. Während der KRD für gesicherte Aussagen zum Kampfmittelverdacht ein möglichst enges Erkundungsraster benötigt (s. Bild 1), bedeutet die Kampfmittelsondierung mittels Bohrungen für den Bauherrn in erster Linie eine Störung des Baugrundes, die es aus geotechnischer Sicht zu begrenzen gilt.

So zeigte sich z.B. bei der Herstellung von HDI-Sohlen im Rahmen mehrerer Berliner Bauvorhaben eine Reduzierung der Festigkeit in den anstehenden Sanden (s. Hans Lorenz Symposium 2007). Zum Ausmaß der durch Kampfmittelsondierungen verursachten Verminderung der Festigkeitseigenschaften des Baugrundes liegen derzeit keine gesicherten, belastbaren Informationen vor.

Konkrete Informationen hierzu sind aber eine wichtige Grundlage für erdstatische Bemessungen, d.h. für die Dimensionierung von Bauteilen, und sind damit auch eine Argumentationsgrundlage in Besprechungen zwischen Bauherrn und KRD. Zudem können nur in Kenntnis der veränderten Festigkeiten Altaufschlüsse, die vor der Kampfmittelerkundung durchgeführt wurden, neu interpretiert werden.



Bild 1: Kampfmittelsondierung für eine Baumaßnahme
(Foto: KED, Hamburg)

1.2 Bedeutung für die WSV

Es obliegt dem Bauherrn, sich im Vorwege einer Baumaßnahme die Kampfmittelfreiheit des Baufeldes z.B. durch den KRD des jeweiligen Bundeslandes bescheinigen zu lassen. Für die WSV ergibt sich daraus folgende Problemstellung:

- Die Zuständigkeitsbereiche der einzelnen Wasser- und Schifffahrtsämter decken sich i.d.R. nicht mit den Grenzen der Bundesländer. Als Folge können für ein Bauprojekt größerer räumlicher Ausdehnung (z.B. die Vertiefung eines Kanals oder eines Flusses) mehrere KRDs zuständig sein, die dann für einzelne Baubereiche unterschiedliche Kampfmittelerkundungsprogramme auf der Grundlage unterschiedlicher Technischer Anleitungen festlegen. Zudem können bei Bundesliegenschaften neben länderspezifischen auch bundesspezifische Vorschriften gelten.

- Für Pfahlgründungen und Spundwänden, die im Zuständigkeitsbereich der WSV häufig verwendete Bauteile sind, werden in den Technischen Anleitungen meist spezifische Anforderungen an die Kampfmittelsondierungen gestellt.
- In Kenntnis des zu erwartenden Baugrundes wird seitens des zuständigen KRd der sogenannte „Verdachtshorizont“ und damit die erforderliche Erkundungstiefe für die Kampfmittelsondierung festgelegt: in organischen oder bindigen Böden geringer Festigkeit ist auch in größeren Tiefen – lt. Hamburger TA Kampfmittelräumung bis 3 m unter deren Schichtunterkante – mit Bomben-Blindgängern zu rechnen. Solche Böden (z.B. Auelehm, Mudde, Klei) treten häufig gewässernah und damit im Zuständigkeitsbereich der WSV auf.
- Laut „Arbeitshilfen Kampfmittelräumung“ liegt *„bei Kriegsende von Soldaten oder Einheiten auf-gegebene andere Munition (... Munition für Handfeuer- und Maschinenwaffen, Granaten, Minen) ... nicht selten an verkehrsgünstiger Stelle in Flüssen oder Seen“* und damit im Zuständigkeitsbereich der WSV.

Aus den Ergebnissen des FuE-Vorhabens können für die WSV Vorschläge zur Planung, Ausschreibung und Durchführung von Kampfmittelerkundungen erarbeitet werden, um den anstehenden Baugrund in seiner Tragfähigkeit möglichst wenig zu beeinträchtigen.

1.3 Untersuchungsziel

Ziel dieses FuE-Vorhabens ist es, die durch die Kampfmittelerkundung entstandene Störung des Baugrundes, d.h. die Reduktion der Festigkeiten, auf der Grundlage von insitu – Versuchen für unterschiedliche Böden qualitativ zu erfassen.

2 Untersuchungsmethoden

Das FuE-Vorhaben soll in enger Zusammenarbeit von der BAW und dem Hamburger Ingenieurbüro Knabe Enders Dührkop Ingenieure GmbH (KED) gemeinsam durchgeführt werden, das über mehrjährige Erfahrung mit der Betreuung von Kampfmittelsondierungen verfügt.

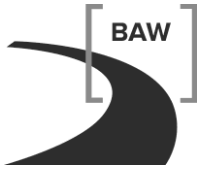
In einem ersten Schritt werden die Kampfmittelverordnungen der Länder und des Bundes hinsichtlich geotechnisch relevanter Anforderungen (Bohrverfahren, Rasterabstand, Erkundungstiefe, etc.) gesichtet und tabellarisch aufbereitet. Parallel wird eine weitergehende Literaturrecherche bzgl. der Störung des Baugrundes durch Bohrungen (in situ – Versuche, numerische Berechnungen) durchgeführt.

Der Einfluss von Kampfmittelsondierungen in nichtbindigen Böden soll in situ unter definierten Bedingungen getrennt für Sande lockerer, mittel dichter und dichter Lagerung (jeweils ungesättigt / gesättigt) durchgeführt werden.

Für den ungesättigten Zustand wird der Sand in 0,3 m mächtigen Lagen im gewünschten Verdichtungsgrad eingebaut. Im Rahmen des Einbaus erfolgt auch die Entnahme von Bodenproben für Klassifikationsversuche. Auf jede Sandlage wird eine dünne Markierungsschicht aufgebracht. Die simulierten Kampfmittelbohrungen werden niedergebracht, anschließend verrohrt und nach dem Ziehen der Verrohrung verfüllt. Die Festigkeit des Sandes wird durch Drucksondierungen vor und nach den Bohrungen bestimmt. Anschließend werden Schürfe angelegt, um mittels der Markierungsschicht die Verformung der Sandlagen – und damit auch den Radius der Bodenstörung – zu dokumentieren und um Bodenproben orientiert zu entnehmen.

Das Prozedere bei der Simulation des gesättigten Zustandes ist noch zu erarbeiten. Die erforderliche Versuchsfeldgröße ergibt sich aus den in den Kampfmittelverordnungen der Länder geforderten Erkundungsrastern; die Erkundungstiefe wird mindestens 3 m betragen. Der Einfluss der Kampfmittelsondierung auf bindige oder organische Böden soll an anstehenden Böden in Feldversuchen untersucht werden. Anschließend ist zu prüfen, ob weitere (Labor-) Versuche unter definierten Bedingungen sinnvoll bzw. erforderlich sind.

Mittels numerischer Simulation soll der Einfluss von Kampfmittelsondierungen auf den Baugrund qualitativ abgeschätzt werden. Die Simulationsergebnisse sind an den Feldversuchen zu validieren.



3 Ergebnisse

Das FuE-Vorhaben wurde Ende 2012 gestartet.

Als Ergebnis einer Sichtung der Kampfmittelverordnungen der einzelnen Bundesländer wurde eine Liste der geotechnisch relevanten Anforderungen erzeugt, die die Planungsgrundlage für die 2013 durchzuführenden Feldversuche sein wird.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: Literaturrecherche, insitu-Versuche im Sand, zugehörige Klassifikationsversuche

2014/15: Feldversuche an bindigen und organischen Böden;
 evt. weitere (Labor-)Versuche;
 numerische Simulation

2016: Auswertung

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2016.

Berücksichtigung von beweglichen oder fixen Strukturen (Schiffe) an der freien Wasseroberfläche im hydrodynamisch numerischen Modell UnTRIM

Netzplan-Nr.: A39550270149

Projektleiter: M. Kastens, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich, Referat Ästuarsysteme I (K2)

E-Mail: Marko.Kastens@BAW.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

In dem Forschungsprojekt der BAW soll geklärt werden, welchen Einfluss Schiffe auf die Hydrodynamik und damit schließlich auch auf den Sedimenttransport z.B. eines Tideästuars haben. Da sich die komplexen natürlichen Prozesse im Ästuar mit denen der Wechselwirkung eines Seeschiffs mit seiner Seeschiff-fahrtsstraße überlagern, liegt die Anwendung eines mathematischen Simulationsmodells nahe, um die Anteile der Veränderung der Hydrodynamik durch ein oder mehrere Schiffe zu quantifizieren.

Das mathematische Verfahren UnTRIM ermöglicht die numerische Simulation vieler für das Tidegebiet bedeutsamer physikalischer Prozesse. Hierzu zählen u. a. die Ausbreitung der Tidewelle, der Wechsel von Ebbe- und Flutstrom, der Transport von Salz, Wärme oder Schwebstoffen im Wasserkörper. Die derzeit aktuellste Version von UnTRIM (UnTRIM², siehe FuE-Projekt UnTRIM-Subgrid Topographie) kann zusätzlich höhere als durch das Berechnungsnetz aufgelöste Informationen der Bathymetrie an der Gewässersohle verarbeiten (SubGrid-Technologie).

Noch nicht möglich ist zurzeit eine Be-/Einschränkung der freien Wasseroberfläche durch feste und/oder bewegliche Strukturen, wie beispielsweise Schiffe oder von z.B. oben eintauchende Sperrwerkstore - im Folgenden allgemein Verblockung der Wasseroberfläche genannt.

1.2 Bedeutung für die WSV

Die gutachterliche Beratung der WSV ist die zentrale Kernaufgabe der BAW. Zur Unterstützung der gutachterlichen Aussagen kommen sehr häufig hydrodynamisch numerische Modelle zum Einsatz. In der BAW in Hamburg ist das mathematische HN-Verfahren UnTRIM das meistgenutzte Werkzeug.

Mit zunehmender Häufigkeit wird von den Ämtern der WSV der Einfluss von Schiffen auf die Hydrodynamik und den Sedimenttransport nachgefragt (siehe dazu auch das FuE-Projekt Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen, A39550270142). Die Berücksichtigung der oben beschriebenen Verblockungen der freien Wasseroberfläche in dem HN-Verfahren UnTRIM eröffnet die Möglichkeit, den Einfluss von Schiffen auf die Hydrodynamik in einer ersten Näherung zu ermitteln.

1.3 Untersuchungsziel

Das Untersuchungsziel ist die Berechnung der veränderten Hydrodynamik aufgrund der Querschnittsverblockung an der freien Wasseroberfläche durch ein Schiff.

Dazu soll im HN-Modell UnTRIM die SubGrid-Technologie auf die freie Wasseroberfläche übertragen werden, so dass eine dynamische Verblockung der Wasseroberfläche im Modell als eine weitere Randbedingung mit berücksichtigt werden kann.

2 Untersuchungsmethoden

Erweiterung des HN-Modells UnTRIM (Programmierung) und numerische Modellierung mit dem HN-Modell UnTRIM.

3 Ergebnisse

Durch die zusätzliche Randbedingung einer verblockten oder gespannten Oberfläche, wurde es nötig einen Lösungsalgorithmus zu entwickeln, der der zusätzlichen Randbedingung Rechnung trägt und trotzdem Lösungen findet, die robust sind. Casulli & Zanolli (2012) haben einen solchen Algorithmus aufgestellt und dokumentiert.

Dieser Algorithmus wurde ebenfalls von V.Casulli an der Universität Trient in den Programmcode UnTRIM² implementiert und getestet. UnTRIM² beinhaltet bereits die SubGrid-Technologie (Casulli, 2011), mit der auch Details, die kleiner sind als die normale Modelldiskretisierung berücksichtigt werden können.

Ferner wurde ein Rahmenmodul in Fortran 95 entworfen und programmiert, dass als Schnittstelle für eine zukünftige Bewegung von Schiffen im Modell UnTRIM dienen soll. Diese Schnittstelle muss erprobt und weiter ausgebaut werden. Sie bedient den UnTRIM²-Kern mit dem Setzen der Randbedingung für die gespannte Oberfläche.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

Nach der Implementierung des neuen UnTRIM-Kerns in die BAW-Umgebung erfolgt das Testen des Modellcodes UnTRIM² und der Schnittstelle mit eigenen einfachen Geometrien (s.Arbeitspaket 3). Bei erfolgreichen Tests und mit positiven Erfahrungen können die Arbeiten im Arbeitspaket 2 und 3 angefangen bzw. fortgeführt werden.

Arbeitspaket 2: Softwareentwicklung, Implementierung und Plausibilitätstests des HN-Modells UnTRIM
Die Entwicklung soll folgende Bedingungen/Annahmen erfüllen:

- Der Schiffskörper wird über eine durch externe Daten beschriebene Bahn durch das Wasser geführt
- Diese externen Daten beschreiben die Position, den Tiefgang, den Kurs und die Geschwindigkeit über Grund
- Plausibilitätstests

Arbeitspaket 3: Schnittstellen, Analysen, Visualisierungen und Validierung

- Literaturrecherche
- Entwicklung von eigenen Datenformaten oder Bereitstellung von Schnittstellen schon verfügbarer Datenformate der Schiffshülle für die Simulation
- Entwicklung von eigenen Datenformaten oder Bereitstellung von Schnittstellen schon verfügbarer Datenformate der Schiffposition, Kurs sowie der Geschwindigkeit
- Schnittstellen zur Datenausgabe von UnTRIM (Schnittprofile und Nahfeldergebnisse)
- Visualisierung und Darstellung (von z.B. Schiffspassagen)
- Parameteranalyse (Wasserstand, Strömung, ...)
- Plausibilitätstests
- Validierungen
- Benchmarks
- Dokumentation
- Anforderungsanalyse zur Erweiterung der vorhandenen Post-Prozessoren Software (Tidekennwertanalyse, Darstellungssoftware, ...)

Arbeitspaket 4: Validierung der Methode mit Naturmessdaten aus dem FuE-Projekt Schiffserzeugter Sedimenttransport in Seeschiffahrtsstraßen

Zeitplan:

2012/13: Arbeitspaket 1 (abgeschlossen)
2013/14: Arbeitspaket 2
2012-14: Arbeitspaket 3
2015: Arbeitspaket 4

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2015.

5 Literatur

Casulli, V. & Stelling, Guus S. (2011): Semi-implicit subgrid modelling of three-dimensional free-surface flows, Int. J. Numer. Meth. Fluids, Volume 67, Issue 4, Pages 441-449, 10.1002/flid.2361
Casulli, V. & Zanolli, P. (2012): Iterative solutions of mildly nonlinear systems, Journal of Computational and Applied Mathematics, Volume 236, Issue 16, Pages 3937-3947, 10.1016/j.cam.2012.02.042.

6 Veröffentlichungen

-/-

Feststofftransport in Ästuaren

Netzplan-Nr.: A39550270150

Projektleiter: Dipl.-Ing. (FH) Ch. Maushake, Abteilung Wasserbau im Küstenbereich,
Referat Ästuarsysteme I (K2)

E-Mail: christian.maushake@baw.de

1 Problemdarstellung und Ziel

1.1 Ingenieurwissenschaftliche Fragestellung und Stand des Wissens

Ein unverzichtbarer Bestandteil für die Validierung der bei der BAW eingesetzten Modellierungssysteme sind robuste in-situ Daten aus Naturmessungen. Derartige Daten bekommen für die Validierung der Modellierungssysteme und die Betrachtung der hydrologischen und sedimentologischen Teilprozesse eine immer größer werdende Bedeutung, so dass folgende Verwendungszwecke genannt werden können:

- Ermittlung gewässerphysikalischer Kenngrößen und ästuarspezifischer Charakteristika für die Validierung von Modellierungssystemen, wie z.B.
 - Tidedynamik
 - max. Strömungsgeschwindigkeiten
 - Durchflussmengen
 - Strömungsverteilung
 - Residuelle Transporte
 - Schwebstoff
 - Durchfluss
 - Lage und Dynamik der Trübungszone
 - Schichtenaufbau in der Bodengrenzschicht
 - Großräumige Morphologie (Bodenformen)
- Analyse hydrologischer und sedimentologischer Teilprozesse in Tideästuaren und Küstengewässern
 - Turbulenz, insbesondere in der bodennahen Schicht
 - Sinkgeschwindigkeiten der Feststoffe in der Wassersäule in charakteristischen Tidephasen
 - Fluid mud Dynamik, insbesondere Dynamik der Lutokline
 - Zusammenhang zwischen fluid – Dichten (bulk density) und Feststoffkonzentrationen
 - Bodenformen und sohlnaher Sedimenttransport
 - Schwebstoffcharakteristik und Flokkulation in der Wassersäule

Die BAW verfügt über umfangreiche Datensätze aus Naturuntersuchungen, die hinsichtlich der genannten Verwendungszwecke erst rudimentär analysiert worden sind. So müssen die für die Validierung der Modellierungssysteme eingesetzten Auswertemethoden weiter wissenschaftlich begleitet und evaluiert werden. Insbesondere ist aber die Untersuchung der (kleinskaligen) physikalischen Teilprozesse von großer Bedeutung für die Weiterentwicklung und Absicherung der mit numerischen Simulationsmodellengewonnenen Expertisen und ist somit von großer Bedeutung für die Aufgabenstellung der BAW. Darüber hinaus ist die Implementierung weiterer physikalischer Teilprozesse in die bei der BAW verwendeten Modellierungssysteme mit Bezug zum Feststofftransport schrittweise fortzuführen. Hierzu sollen durch eine wissenschaftliche Analyse der vorhandenen Datensätze fachlich gesicherte Vorgehensweisen erarbeitet werden.

Darüber hinaus existiert für die Analyse einiger physikalischer Teilprozesse keine oder nur eine unzureichende Datengrundlage. Hierfür sind noch verbesserte Beobachtungsmethoden zu entwickeln, bzw. zu erproben. Dies gilt z.B. für die genannten Punkte „Sinkgeschwindigkeiten“ und „fluid-mud Dynamik“.

1.2 Bedeutung für die WSV

Bei den geplanten Ausbauvorhaben der Seeschiffahrtsstraßen (zurzeit: Elbe, Weser, Ems) spielen Fragestellungen zum langfristigen Sedimentmanagement eine immer größere Rolle. Damit gewinnen die von der BAW für eine gutachterliche Beratung der WSV eingesetzten hydromorphologischen Modellierungsverfahren eine größere Bedeutung. Die Validierung und Qualitätssicherung der Berechnungsergebnisse ist ohne robuste in-situ-Daten aus Naturuntersuchungen in planrechtlichen Verfahren nicht mehr darstellbar. D.h. die Weiterentwicklung der für Naturuntersuchungen einzusetzenden Mess- und Analyse-Methoden ist imo.g. Kontext von unverzichtbarer Bedeutung für die fachlich gesicherte Aufgabenerfüllung der BAW für die WSV.

1.3 Untersuchungsziel

Validierung und Weiterentwicklung der bei der BAW eingesetzten in-situ - Methoden zur Untersuchung der Feststoffdynamik und der Austauschprozesse in der Bodengrenzschicht in den Hauptästuaren der Deutschen Bucht (Elbe, Jade/Weser, Ems) mit folgenden Teilaufgaben:

- Generierung von Validierungsdaten für die numerische Modellierung
 - Konvertierung akustischer Backscatterdaten in Schwebstoffkonzentrationen
 - Analyse der einzusetzenden akustischen Frequenzen (z.B. 300, 600 kHz)
 - Vergleich und Bewertung der Ergebnisse aus akustischen und optischen Messungen
 - Korrelationsbetrachtungen der gefundenen Schwebstoffbilanzen mit Korngrößenanalysen und Dichteprofilen, sowie der hydrologischen Randbedingungen
 - Vergleich der Ergebnisse aus verschiedenen Ästuarsystemen
- Entwicklung und Test von Beobachtungskonzepten, um vorhandene Lücken bei der Beschreibung physikalischer Teilprozesse zu schließen, im Einzelnen:
 - Fließgeschwindigkeiten in hochkonzentrierten Suspensionen
 - Untersuchungen zur Beschreibung der Lutokline (dynamisch)
 - In-situ Erfassung von Sinkgeschwindigkeiten
 - Weitere Entwicklung, bzw. Erprobung von Methoden zur Beobachtung der Charakteristik von Schwebstoffen und der Flockendynamik

2 Untersuchungsmethoden

Die BAW verfügt über umfangreiche Datensätze aus Naturuntersuchungen, die hinsichtlich der forschungsrelevanten Parameter erst in Ansätzen untersucht worden sind (AquaVision 2009-2011). Daher sind zunächst wissenschaftliche Analysemethoden einzusetzen bzw. zu entwickeln (AP1-3). Daraus abgeleitet sind Konzepte für weitergehende Untersuchungen abzuleiten (AP4-5).

3 Ergebnisse

Das marum – Zentrum für Marine Umweltwissenschaften der Universität Bremen ist auf der Basis eines seit 2008 bestehenden Kooperationsvertrages als externer universitärer Partner in die Durchführung des FuE – Vorhaben eingebunden. Im Rahmen dieser Kooperation hat in der ersten Phase des Projektes eine Aufarbeitung und Analyse der vorliegenden Ergebnisdatensätze stattgefunden. Dieses Vorgehen entspricht den Arbeitspaketen AP1 und AP2 des vorliegenden Bearbeitungskonzeptes. Es sind insgesamt 21 vorliegende Datensätze zur in – situ Erfassung der Schwebstoffdynamik in Tideästuaren aus Elbe, Weser und Ems analysiert, aufbereitet und in einem Datenbanksystem erfasst und abgelegt worden. Die Ergebnisse sowie Vorschläge zum weiteren Vorgehen sind im Rahmen einer BAW internen Veranstaltung zu diesem Thema vorgestellt und festgelegt worden. Hieraus ergeben sich das Arbeitsprogramm und der Zeitplan für 2013 und 2014.

4 Arbeitsprogramm und Zeitplan

2013: weitere Analyse der vorliegenden Datensätze aus den Hauptästuarsystemen der Deutschen Bucht (Elbe, Weser, Ems)

Entwicklung von Beobachtungskonzepten für vorhandene Lücken bei der Beobachtung physikalischer Teilprozesse. Hierbei wird vor allem die Dynamik der hochkonzentrierten Suspensionen, wie sie z.B. in der Ems vorherrschen, von Interesse sein.

2014: Ggf. Planung und Durchführung entsprechender Messkampagnen
Veröffentlichung und Präsentation der Ergebnisse

Laufzeit des Vorhabens von 2012 bis 2014.

5 Literatur (Auszug)

AquaVision (2009-2011), Suspended Sediment Measurements, *Reports on 7 field surveys conducted by commission of the Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Germany.*

6 Veröffentlichungen

Becker, Maushake, Winter: Evaluation of the influence of sediment absorption on ADCP backscatter calibration in estuaries using in-situ measurements of particle size distributions In: Particles in Europe (PiE) 2012, 17-19 Oct. 2012, Institut de Ciències del Mar (ICM), Barcelona, Spain.
(paper will be published in a special issue of Geo-Marine Letters in 2013)