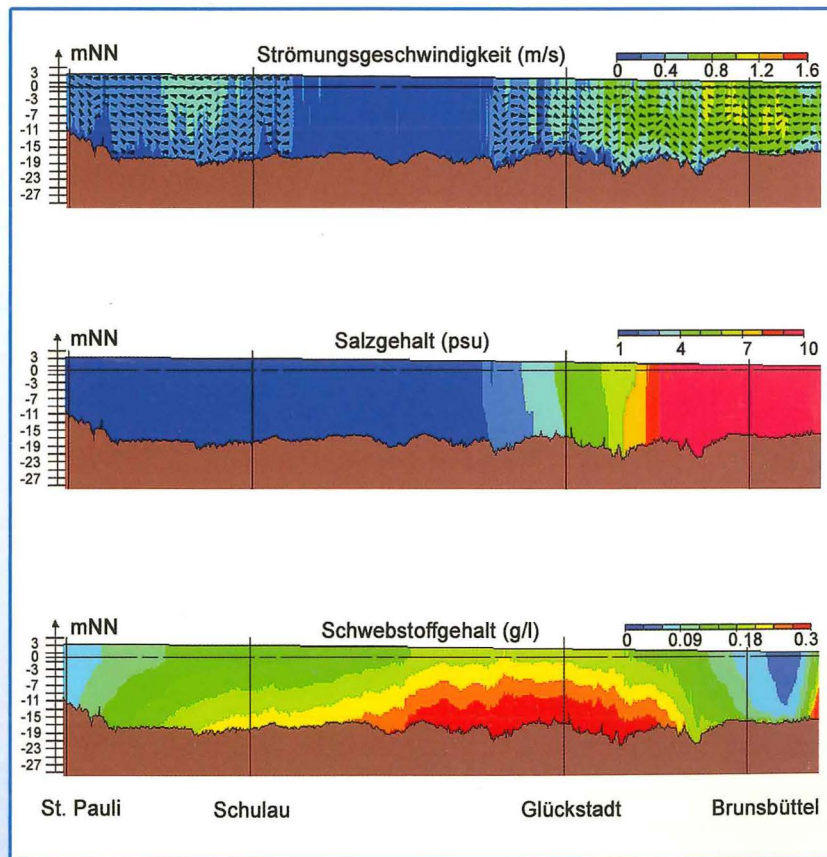




MITTEILUNGEN



Mitteilungsblatt

der

Bundesanstalt für Wasserbau

Nr. 86

Karlsruhe • Dezember • 2003

ISSN 0572-5801

Herausgeber (im Eigenverlag):

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Postfach 21 02 53, 76152 Karlsruhe
Telefon: 0721 9726-0
Telefax: 0721 9726-4540
e-mail: info.karlsruhe@baw.de
Internet: <http://www.baw.de>

Übersetzung, Nachdruck oder sonstige Vervielfältigung - auch auszugsweise - ist nur mit Genehmigung des Herausgebers gestattet.

© BAW 2003

Titelbild: Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalts- und Schwebstoffverteilung im Längsschnitt durch das Elbeästuar bei beginnendem Ebbstrom (UnTrim + Sedimorph)

Inhaltsverzeichnis

Seite

GRUSSWORTE

WITTE	11
KRAUSE	17
RODIEK	21
SCHUBERT	25

BESCHREIBUNG UND ANALYSE DER ÄSTUARDYNAMIK IN DEN SEESCHIFFFAHRTSSTRASSEN

JÜRGES / WINKEL	
Ein Beitrag zur Tidedynamik der Unterems	29
LANG	
Ein Beitrag zur Tidedynamik der Innenjade und des Jadebusens	33
SCHÜTTRUMPF / KAHLFELD	
Hydraulische Wirkungsweise des JadeWeserPorts	43
SCHUBERT / RAHLF	
Hydrodynamik des Weserästuars	49
BOEHLICH	
Tidedynamik der Elbe	55
SEISS / PLÜSS	
Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht	61
WINKEL	
Das morphologische System des Warnow-Ästuars	65
RUDOLPH	
Sturmfluten in den deutschen Ästuaren	69

GRUNDLAGEN FÜR DIE SICHERHEIT UND LEICHTIGKEIT DES SCHIFFSVERKEHRS

LIEBETRUTH / EISSFELDT	
Untersuchungen zur Nautischen Sohle	77
ULICZKA / KONDZIELLA	
Dynamisches Fahrverhalten extrem großer Containerschiffe unter Flachwasserbedingungen	83
BIELKE /SIEBENEICHER	
Entwicklung, Planung und Neubau von Wasserfahrzeugen	89

DIE MATHEMATISCHE MODELLIERUNG ALS UNVERZICHTBARE BERATUNGSGRUNDLAGE

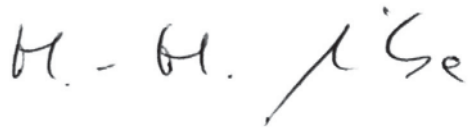
HEYER	
Zur Bedeutung mathematischer Modelle im Küstenwasserbau	97
LANG	
Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet	101
WEILBEER	
Zur dreidimensionalen Simulation von Strömungs- und Transportprozessen in Ästuaren	109
MALCHEREK	
Von Sohlevolutions- zum vollständigen Morphologiemodell: Eine road Map zur SediMorph-Entwicklung	113
VIERFUSS	
Seegangmodellierung in der BAW	117

Gesamtinhaltsverzeichnis aller bisher erschienenen Mitteilungsblätter	119
---	-----

Vorwort

Im Juni 1953, also vor 50 Jahren, erschien Heft Nr. 1 der Mitteilungsblätter der Bundesanstalt für Wasserbau. In nunmehr 86 Ausgaben berichten vor allem Mitarbeiter der BAW, Kollegen aus der WSV und auch aus Universitäten und Ingenieurbüros über das Aufgabengebiet des Verkehrswasserbaus und dokumentieren damit die fachliche Arbeit für den Erhalt und die Weiterentwicklung der Wasserstraßen als einen sicheren, wirtschaftlichen und umweltverträglichen Verkehrsträger.

Anlässlich der Verabschiedung von Herrn LBDir Dr.-Ing. Gerd Flügge und der Einführung seines Nachfolgers zum 1. Juli dieses Jahres ist dieses Mitteilungsblatt dem Themenspektrum der Dienststelle Hamburg der BAW gewidmet.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'H.-H. Witte'. The signature is written in a cursive style with a long, sweeping underline.

Dr.-Ing. H.-H. Witte
Direktor und Professor
der Bundesanstalt für Wasserbau

**Grußworte zur
Verabschiedung von
Herrn LBDir Dr.-Ing. Gerd Flügge
und Einführung seines Nachfolgers**

Begrüßung

DR.-ING. HANS-HEINRICH WITTE, DIREKTOR UND PROFESSOR DER BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU

Meine sehr geehrten Damen und Herren,
lieber Herr Dr. Flügge, liebe Frau Flügge,
liebe Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Dienststelle Hamburg!

Ich begrüße Sie zu unserer heutigen Veranstaltung, die – lieber Herr Flügge – in ganz besonderem Maße Ihre Veranstaltung ist. Wir sind heute Ihnen zu Ehren zusammengekommen, um im Rahmen Ihrer Verabschiedung Ihr Wirken für die Dienststelle Hamburg der Bundesanstalt für Wasserbau und damit der Bundeswasserstraßen im Küstengebiet zu würdigen.

Dieser Tag ist damit auch ein Tag der Dienststelle Hamburg, denn zusammen mit Ihnen, Herr Flügge, steht die Abteilung Wasserbau im Küstenbereich mit ihren Leistungen, ihrer Kompetenz und ihrem Potenzial gleichfalls im Blickpunkt. Mit einem Überblick aus den Fachreferaten von der Geotechnik über den Wasserbau hin zur Schiffstechnik werden im zweiten Teil der Veranstaltung aus der fachlichen Sicht die aktuellen Aufgaben oder besser die derzeitigen Herausforderungen der Dienststelle in ihrem Wirken für das Bundesministerium für Verkehr-, Bau- und Wohnungswesen und die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes sowie für die Küstenländer dargestellt.

Ich freue mich besonders, dass Sie, Herr Ministerialdirigent Krause, es ermöglichen konnten, heute persönlich bei uns zu sein und ein Grußwort anlässlich des Leitungswechsels dieser Dienststelle an uns richten werden. Ich begrüße Sie ganz herzlich! Sie unterstreichen mit Ihrem Kommen die Bedeutung, die Sie der BAW und hier nun besonders der Dienststelle Hamburg in ihrer Funktion als wissenschaftlich eigenständiger Gutachter zuordnen. Dies ist gerade in der jetzigen Zeit nach dem Elbe-Hochwasser des vergangenen Jahres und den daraus aus fachlicher Sicht zu unrecht abgeleiteten Vorwürfen an den Verkehrswasserbau von besonderer Bedeutung. Ohne Ihre Unterstützung und Förderung könnte die BAW ihren Behördenzweck, die fachwissenschaftliche Beratung des BMVBW und der WSV, nur schwer erfüllen.

Als Auftakt dieser Veranstaltung haben Sie, Herr Präsident Dr. Knieß, uns mit Ihrer Audiovision eine Reise durch den Wasserbau im Küstenbereich und damit verbunden durch das fachliche Wirken von Herrn Flügge beschert. Bilder, in dieser eindrucksvollen Art und Weise zusammengestellt, sagen mehr als Worte – viele Botschaften, die zu dem heutigen Anlass auszusenden sind, haben Sie bereits vermittelt. Haben Sie vielen Dank dafür.

Für das Gelingen der Aufgaben an den Wasserstraßen ist der gute und intensive Kontakt zwischen den Ämtern und Direktionen der WSV auf der einen und der BAW auf der anderen Seite unablässliche Voraussetzung. Auch wenn die wissenschaftliche Eigenständigkeit der BAW und ihre für die Begutachtung von Maßnahmen hohen Anforderungen an Grundlagendaten aus der WSV nicht zu jeder Zeit nur Freude auslöst, so haben die Jahre, auf die wir heute zurückblicken, bewiesen, dass die Partnerschaft von WSV und der BAW als der fachwissenschaftliche Dienstleister Garant für die erfolgreiche Durchführung komplexer, meist in Teilen der Öffentlichkeit strittiger Verfahren sind. Erlauben Sie mir, an dieser Stelle der WSV für die bisherige und zukünftige Zusammenarbeit zu danken. Stellvertretend für unsere Auftraggeber, für die WSV, möchte ich Sie, Herr Präsident Dr. Knieß, zusammen mit Herrn Präsident Frerichs und Herrn Vizepräsident Rodiek begrüßen und willkommen heißen.

Kernaufgaben der Dienststelle Hamburg sind u. a. die Prognose abiotischer Änderungen in den Ästuaren von Nord- und Ostsee infolge verkehrswasserbaulicher Maßnahmen und die Optimierung von Strombaukonzepten zur Minimierung von Unterhaltungsmaßnahmen in den Wasserstraßen. In diesem Aufgabenfeld ergeben sich eine Vielzahl von Schnittstellen zu benachbarten Bundesoberbehörden. Nennen möchte ich den Deutschen Wetterdienst, das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie und die Bundesanstalt für Gewässerkunde. Stellvertretend für die Gäste aus diesem Bereich begrüße ich aus dem BSH Herrn Vizepräsident Dr. Rühl.

Voraussetzung für eine erfolgreiche Tätigkeit an den deutschen Ästuaren ist auch ein guter Kontakt zu den Dienststellen und Gesellschaften der Küstenländer. Fachliche Kontakte bestehen hierbei sowohl zu den Einvernehmensbehörden im Rahmen von Planfeststellungsverfahren als auch als Auftragnehmer im Rahmen von Maßnahmen der Länder im Bereich der Bundeswasserstraßen. Ich freue mich, Herrn Prof. Dr. Reincke, Leiter der Gewässergütestelle Elbe, Herrn Leitenden Baudirektor Starke vom Niedersächsischen Landesbetrieb für Wasserwirtschaft und Küstenschutz und Herrn Geschäftsführer Wülfers von der Jade-Port Realisierungsgesellschaft für alle Landesvertreter begrüßen zu können. Gerne hätte ich auch Herrn Dr. Dücker, Hafenbaudirektor der Freien und Hansestadt Hamburg, begrüßt – aber auf Grund anderer beruflicher Verpflichtungen ist er heute leider verhindert.

Forschungs- und Entwicklungstätigkeit ist ein wesentliches Standbein des erfolgreichen Arbeitens der BAW. Ohne eine konsequente Weiterentwicklung der für die Aufgabenerledigung eingesetzten Methoden und Verfahren in den Aufgabenfeldern der Geotechnik, des Wasserbaus und des Schiffbaus haben die Aussagen der BAW keinen Bestand. Darüber hinaus beteiligt sich die Dienststelle Hamburg auch an der vom Bund und den Küstenländern geförderten Küstenforschung sowohl durch eigene Projekte als auch durch die im Hause der Dienststelle Hamburg eingerichtete Geschäftsstelle und Bibliothek des Kuratoriums für Forschung im Küsteningenieurwesen. Ich begrüße alle Vertreter aus Wissenschaft und Forschung und heiße Sie herzlich willkommen.

Herr Dr. Rohde, ich freue mich, dass Sie als Vorgänger von Herrn Dr. Flügge im Amt heute auch zu uns gekommen sind. Mit Ihnen begrüße ich alle Ehemaligen aus der BAW, der WSV, sowie alle Weggefährten von denen Sie, Herr Dr. Flügge, auf Ihren verschiedenen Stationen begleitet wurden.

Lieber Herr Dr. Flügge, am 30. Juni, also in 4 Tagen, werden Sie nach fast 15 Jahren die Leitung der Dienststelle Hamburg der BAW in die Hände Ihres Nachfolgers übergeben. Sie blicken dann zurück auf ein 33jähriges Berufsleben, das dem Ingenieurwesen, dem Wasserbau und im speziellen den Ästuaren der Nord- und Ostsee von der Ems bis zu der Peene gewidmet – und hier folgt jetzt mit Blick auf die Zukunft - bewusst ein IST und nicht ein WAR. Dies ist Anlass, innezuhalten und ein Stückweit zurückzublicken - die Bilder der einleitenden Audiovision bereichsweise mit Worten zu untersetzen.

Nach Ihrer Reifeprüfung an der Herderschule in Lüneburg entschlossen Sie sich zum Studium des Bauingenieurwesens an der TU Hannover und bereiteten dies mit einem Praktikum in den Bereichen Stahl- Massiv- und Holzbau vor. Sie wollten sich zu einem konstruktiven Ingenieur ausbilden. Doch dann kam alles anders, die auf einzelne Vorlesungen bezogenen Studiengebühren in Niedersachsen wurden von einer Semestergebühr abgelöst – sie waren frei und belegten auch Veranstaltungen, die Sie eigentlich gar nicht besuchen wollten. So kam es dann, dass Sie als "Wasserbaustudent" in den Listen von Prof. Hensen erschienen. Hiermit haben Sie eine Ihr berufliches Leben prägende Voraussetzung erworben: Sie konnten an einer der legendären Wasserbau-Exkursionen teilnehmen (die Ihrige ging nach Südamerika) und wie kann es anders sein, wenn man auf diese Art Kontakt zum Wasserbau bekommt: Sie haben dann Ihr Studium des Bauingenieurwesens mit der Vertieferrichtung Wasserbau abgeschlossen.

“Mein Lebensweg ist ein Ergebnis glücklicher Umstände und Zufälle” sagten Sie einmal – eindeutig bestätigen kann ich, dass Ihre Ausrichtung auf das Wasserbauwesen ein glücklicher Umstand für die deutschen Ästuar- an Nord- und Ostsee war.

Ihrem Studium folgten 7 ¼ Jahre wissenschaftlicher Tätigkeit im Franzius-Institut der Universität Hannover, zunächst unter der Leitung von Professor Hensen und nach seiner Emeritierung unter Professor Partenscky. Aus dieser Zeit gäbe es viel zu berichten. Herausragend waren sicherlich Ihre Gutachten über die Kühlwasserentnahmen und –einleitungen für die Kernkraftwerke Unterweser und Brokdorf und die nachfolgende Vertretung der Gutachten in den Erörterungsterminen. Ich habe Ihre Zeit im Franzius-Institut nicht erlebt, außerdem bin ich ja auch bei der Konkurrenz, im Leichtweiß-Institut, ausgebildet worden. Ich lasse am besten Herrn Professor Partenscky sprechen, der in Ihrem Zeugnis schrieb:

“Bei allen ihm übertragenen Arbeiten zeichnete sich Herr Dipl.-Ing. G. Flügge durch seine Einsatzbereitschaft, sein Verantwortungsbewußtsein, seine organisatorischen Fähigkeiten und seine Führungseigenschaften in hervorragender Weise aus. Als Einsatzleiter bei verschiedenen Naturmeßprogrammen, die sich u. a. auf Strömungs- und Salzgehaltsmessungen in der Elbe, auf Sauerstoff- und Temperaturmessungen in der Weser erstreckten, überzeugte Herr Dipl.-Ing. G. Flügge durch seine Umsicht und sein vorbildliches Verantwortungsbewußtsein. Beim Umgang mit staatlichen Dienststellen und Firmen sowie auf Erörterungsterminen, bei denen er wiederholt das Franzius-Institut nach außen hin vertrat, zeichnete sich Herr Flügge darüber hinaus durch sein Verhandlungsgeschick, die Klarheit seiner Darstellungen und seine Überzeugungskraft besonders aus.“

Dem ist nichts hinzuzufügen – und mit dem beurteilenden Blick Ihres Vorgesetzten auf Ihre damaligen Kollegen und Mitarbeiter schrieb er:

“Bei seinen Kollegen und Untergebenen war Herr Dipl.-Ing. G. Flügge durch seine mitreißende Einsatzfreude, seine Pflichtauffassung und Kooperationsbereitschaft ein stets beliebter und geachteter Mitarbeiter und Vorgesetzter.“

Es folgte die zweite große Station in Ihrem Berufsleben.

Am 1. Januar 1978 wechselten Sie vom Franzius-Institut zu der 1977 gegründeten Wassergütestelle. Sie waren deren erster Chef und hatten als erstes die Aufgabe, diese gemeinsame Dienststelle der Elbanliegerländer aufzubauen. Hierzu gehörte zunächst Stellen- und Haushaltsmittel einzuwerben, geeignete Mitarbeiter auszuwählen und dann natürlich vor allem die Konzeption und die inhaltliche Umsetzung des Auftrages der Wassergütestelle. So veränderten Sie die bisher üblichen Messprogramme der Gewässergüteuntersuchungen. Die Erfassung der Gütedaten mittels tidephasen-gleicher Längsprofile sollen als ein Beispiel dafür stehen. Forschungsvorhaben, wie z. B. das Pilotprojekt “Gewässergüte Tidegewässer”, rundeten die fachliche Arbeit zusammen mit der Mitwirkung in einer Vielzahl nationaler als auch internationaler Fachauschüsse und Arbeitsgruppen ab.

Sie sind damit zu dem “Elbe-Kenner” der Republik geworden. Als kleine Vorschau: Dies zeigt sich auch darin, dass für viele Jahre hier in der BAW die Elbe immer Chefbehandlung erfuhr.

Von besonderer Bedeutung dieser beruflichen Phase ist aber in meinen Augen, dass Sie Ihren fachlichen Horizont maßgeblich erweiterten. Sie wurden der Wasserbau-Ingenieur, der in der Biotik, in der Ökologie zu Hause ist. Und dies nicht nur fachlich, sondern auch durch viele persönliche Kontakte zu Umweltverbänden! Uns aus der BAW

sind Ihre Berichte über den Stint als Indikatorfisch nachhaltig in Erinnerung geblieben. Und dass Sie der Wassergütestelle in guter Erinnerung geblieben sind, zeigt sich auch darin, dass Ihre ehemalige Dienststelle nahezu vollzählig heute hier anwesend ist.

Parallel zu Ihrer Tätigkeit in der Wassergütestelle, und auch dies soll hier der Vollständigkeit halber nachrichtlich erwähnt sein, haben Sie im Februar 1982 Ihre Promotion zum Thema "Transport und Ausbreitungsmechanismen in Flüssen und Tideästuarien unter besonderer Berücksichtigung der Strömungsturbulenz" mit Auszeichnung zum Abschluss gebracht.

Nach fast 11 Jahren Gewässergütestelle kamen Sie dann zu uns. Am 1. November 1988 haben Sie die Leitung der Außenstelle Küste der BAW übernommen. Die Bezeichnung Außenstelle war Ihnen von Anfang an ein Dorn im Auge. Fachlich war es begründet, denn es werden hier Aufgaben wahrgenommen, die im Stammhaus nicht wahrgenommen werden. Aber viel treffender sind Ihre Worte - und mit diesen Worten sind vielleicht Sie selbst ein Stück weit beschrieben: Sie sagten, dass Außenstelle mit "A s t" abgekürzt wird - und ein Ast, der kann leicht abgesägt werden. So wurde die Außenstelle Küste, die AK, dann 1999 zur DH - Dienststelle Hamburg der BAW - umbenannt.

Wichtige Projekte in Ihrer Amtszeit waren der SKN -14m Ausbau der Außenweser, der Ausbau des Seekanals Rostock mit der Umgestaltung des Molensystems Warnemünde, die Anpassung der Unter- und Außenelbe, die bedarfsweisen Vertiefungen der Unterems zur Überführung der großen Werftschiffe aus Papenburg, das Emssperrwerk mit Staufunktion, der Jade-Weser-Port - um nur einige wenige der Projekte während Ihrer Amtszeit zu benennen. In allen diesen Projekten ging es um Machbarkeitsstudien, Wirkungsprognosen verknüpft mit Strategien zur Minimierung unerwünschter hydrodynamischer und morphologischer Veränderungen und vor allem auch um die Optimierung der Wirtschaftlichkeit notwendiger verkehrswasserbaulicher Ausbau- und Unterhaltungsmaßnahmen. Bei all diesen Maßnahmen überzeugten Sie immer durch Ihren brillanten Ingenieurverstand - kreative Ideen waren Ihre Sache, so, um ein plakatives Beispiel zu nennen, die Idee Schiffsüberführungen auf der Ems rückwärts durchzuführen, um damit sparsam mit der verfügbaren Wassertiefe umzugehen.

Aufbauend auf Ihrem breiten fachlichen Spektrum haben Sie Ihre Arbeit immer im Spannungsfeld zwischen Fachwissenschaft, ingenieurgerechter Realisierung, Ökologie und Ökonomie gesehen und gestaltet. Sie waren insoweit nicht nur Gutachter, Sie waren immer Motivator und Macher - vor allem in schwierigen Projektphasen. Im Sinne der Sache sind Sie in der Öffentlichkeit präsent: Als „Wasserbaupapst“ wurden Sie vor noch nicht langer Zeit in der Presse der Region bezeichnet. Zahlreiche Planfeststellungstermine haben Sie erfolgreich bestritten: *"Wir gehen aufrecht in die Schlacht, hinter uns steht die Physik"* war Ihr Motto auch bei den schwierigeren Verfahren. Dieses Motto drückt sich auch in einem anderen Satz von Ihnen aus: *"Ich lasse über alles mit mir reden - nur nicht über die Physik!"*

Aufbauend auf Ihrem tiefen Wissen zu den Möglichkeiten und Grenzen der hydraulischen Modellierung, die Sie im Franzius-Institut gewannen, dem Wissen um die Notwendigkeit der Systembetrachtungen bei der Analyse von Maßnahmen in Ästuarien, haben Sie nach sorgfältiger Analyse zu Beginn Ihrer Tätigkeit einen grundlegenden Strukturwandel in den Bearbeitungsmethoden der Dienststelle Hamburg eingeleitet. Diese Zukunftsentscheidung haben Sie nicht halbherzig getroffen, sondern mit allen Konsequenzen und gegen alle Bedenken die mathematische Modellierung als die Bearbeitungsmethode für die wasserbauliche Systemanalyse der Ästuarien eingeführt und umgesetzt. Es war der richtige, es war der erfolgreiche Weg.

Entsprechend konsequent haben Sie die Leitungsaufgabe wahrgenommen. Personalauswahl war immer eine der wichtigsten Aufgaben. Auch hierfür kann ich einen Ihrer markanten Sätze verwenden: *"Personalfehlentscheidungen sind die anhänglichsten!"*

Bei dieser Sorgfalt, dieser Motivation durch Vorbild steht nun die Dienststelle Hamburg als kompetenter, leistungsstarker Berater der WSV da. Auch wenn die fachlichen Herausforderungen nicht ab- sondern eher zunehmen, glaube ich, dass es richtig ist festzustellen: Die Dienststelle Hamburg ist flügge geworden!

15 Jahre Leitung der Dienststelle sind verbunden mit 15 Jahren Elbtunnel, mit 15 Jahren Zurückstellen privater Vorhaben und Pläne. Auch wenn ich froh gewesen wäre, wenn Sie noch ein paar Jahre weiter aktiv gewesen wären, ist Ihre Entscheidung zu respektieren! Auch nach dem Leitungswechsel hier in Hamburg bleiben Sie zunächst aktiv, denn Sie haben sich bereit erklärt, den Beginn Ihrer Freiphase in der Altersteilzeit noch etwas nach hinten zu schieben, um der BAW für den Abschluss der Gutachten für den Jade–Weser–Port weiterhin zur Verfügung zu stehen.

Lieber Herr Flügge, für Ihr Wirken in der Dienststelle, in die Dienststelle hinein und für die Wasserstraßen an Nord- und Ostsee möchte ich Ihnen meinen Dank aussprechen und für die Zukunft alles Gute wünschen!

Liebe Frau Flügge, nun wird Ihr Mann bald etwas mehr Zeit für die privaten Belange haben. Bei dem Engagement, das Ihr Mann für seine Aufgabe mitgebracht hat, ist im privaten Bereich sicherlich vieles nicht so verfolgt worden, wie es hätte sein können. Sie haben Ihrem Mann auch in den ja nicht immer einfachen Situationen beigestanden – der Erfolg Ihres Mannes hatte Ihre Unterstützung, Ihren Beistand mit als Voraussetzung. Ich möchte mich bei Ihnen dafür bedanken. Liebe Frau Flügge, vor 15 Jahren haben Sie Ihren Mann, wie auf dem Bild gezeigt, bei uns abgeliefert, so wie es jetzt das zweite Bild zeigt, geben wir ihn Ihnen zurück. Es ist offensichtlich, er freut sich auf die vor Ihnen liegende Zeit.

Meine Damen, meine Herren, ich freue mich, Ihnen in Nachfolge von Herrn Dr. Flügge als neuen Leiter der Dienststelle Hamburg und Leiter der Abteilung Wasserbau im Küstenbereich der BAW, Herrn Dr.–Ing. Heyer, vorstellen zu können. Wobei, nach mehr als fünfjähriger Tätigkeit als Leiter des Referates K3, sich eine Vorstellung im eigentlichen Sinne erübrigt; Herr Dr. Heyer ist einschlägig bekannt.

Dennoch ein paar Daten aus Ihrem beruflichen Weg. Nach dem Studium der Geowissenschaften mit dem Schwerpunkt Ozeanographie waren Sie als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Meereskunde der Universität Hamburg und am Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen der Universität Hannover tätig. Sie promovierten sich dort mit dem Gesamturteil „mit Auszeichnung bestanden“ zum Doktor–Ingenieur.

Als Hamburger kamen Sie im September 1987 zur Bundesanstalt für Wasserbau nach Karlsruhe. Sie begannen in der heutigen Abteilung Wasserbau im Binnenbereich und wechselten dann zur damaligen Abteilung für Informationstechnik, in der Sie die Leitung des Referates Informationstechnik im technischen Bereich übernahmen. Das vor kurzem prämierte Produkt WaGIS ist eines Ihrer “Kinder”. Mit der IT schon fast auf dem Weg zu unserem dritten Standort Ilmenau gingen Sie im Oktober 1997 als Karlsruher zu Ihren beruflichen und privaten Wurzeln zurück und übernahmen die Leitung des Referates K3 hier in der Dienststelle Hamburg.

Lieber Herr Dr. Heyer, ich freue mich, Ihnen die Leitung der Dienststelle Hamburg und die Leitung der Abteilung Wasserbau im Küstenbereich übertragen zu können! Die Aufgabe, die Sie hiermit übernehmen, ist Ihnen wohlbekannt – die persönlichen Voraussetzungen für den Erfolg bringen Sie mit, hier in der Dienststelle sind Sie anerkannt und geachtet! Herr Heyer, für Ihre neue Aufgabe wünsche ich Ihnen Kraft, Erfolg, Gesundheit und immer eine “gute Hand”!

Grußwort

MINDIRIG. NORBERT KRAUSE, LEITER DER UNTERABTEILUNG WASSERSTRASSEN IM
BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU- UND WOHNUNGSWESEN

Meine sehr verehrten Damen und Herren,

lieber Herr Dr.-Ing. Flügge, Ihre Verabschiedung, und lieber Herr Dr.-Ing. Heyer, Ihre Amtseinführung, fällt in eine Phase bedeutender Zukunftsentscheidungen für die Wirtschaftsstandorte, die seit längerem auf Schifffahrt an Flüssen und Kanälen setzen. Die Oberflächengewässer durchziehen Kulturräume, bei denen in unserem dicht besiedelten Land kaum ein Quadratmeter ohne rechtstaatliche Bindung und Bestimmung ist. Entscheidungen über den Umgang mit den Gewässern und den Raumnutzungen in ihren Einzugsgebieten müssen sich an dem Faktum ausrichten, dass ein Strom – beispielsweise die Elbe mit über 1.000 km Länge – gespeist wird aus mittleren und kleineren Nebenflüssen und Bächen mit insgesamt über hundertfacher Länge und nicht zuletzt vom Grundwasser. Entscheidungen über den Umgang mit Gewässer müssen die erdgeschichtlichen, talbildenden hydrodynamischen und morphologischen Vorgänge respektieren, die Erosion, das Mäandrieren, die Sedimentation und die Deltabildung. Ausprägungen dafür sind z. B. das Elbsandsteingebirge und die weite Elbetallandschaft in ihrem heutigen Mittellauf, der vor Jahrtausenden seinen Weg zum Meer weit im Nordosten des heutigen Bettes nahm.

Menschliche Ansiedlungen haben seit alters her bevorzugt in Flusstälern stattgefunden. Mit der Bevölkerungszunahme wurden die Gewässerufer zunächst im Talraum fixiert, um die Siedlungen vor der zeitweilig gefährlichen Kraft der Flüsse zu schützen. Zum Leben und Überleben wurden Deiche gebaut und einige Begradigungen vorgenommen, um die Eisabführung zu erleichtern. Hier und da kam der Mensch mit Durchstichen dem natürlichen Prozess des Mäanderdurchbruches zuvor, um den Hochwasser-Abfluss zu begünstigen. In diesem Zusammenhang lassen Sie mich ein Beispiel anführen: Magdeburg ist bei der Flutkatastrophe 2002 nur deshalb vor noch Schlimmerem bewahrt worden, weil nach der Hochwasserkatastrophe von 1845 das Pretziener Wehr und der Flutkanal gebaut wurden, womit sich ein Drittel des Katastrophenhochwassers um die Stadt herumleiten ließ. Motiv für diese Maßnahme waren der Schutz von Menschen und Kulturwerten. In jüngerer Zeit wurde die Schiffbarkeit ihrer standortstärkenden Vorteile wegen mit Niedrig- und Mittelwasserkorrekturen verbessert. Es ist ebenso irrig wie naturwissenschaftlich unhaltbar, diese Maßnahmen im Niedrig- und Mittelwasserbett in ursächlichem Zusammenhang mit Hochwassergeschehen zu bringen. Gleichwohl wird solches in haltlosen Behauptungen weiterhin als Mittel zum Zweck instrumentalisiert.

Hier an der Tideelbe zeigen sich Schiffbarkeit und Verkehrswasserbau, Wasserwirtschaft und Wirtschaft, Wasser und Umwelt als synthetische Elemente. Nach der Sturmflut von 1962, die in Hamburg 340 Menschen in den Tod riss, wurde das Niveau des Hochwasserschutzes konsequent erhöht und mit Sperrtoren an den Nebenflüssen eine gleichwertige Schutzlinie gebildet. Nur so ist es nach derzeitigem Ermessen weiterhin vertretbar, dass die weite Kulturlandschaft hinter den Deichen und Sperrtoren für das Arbeiten und Wohnen genutzt wird. Die Menschen vertrauen auf das begrenzte Schutzniveau und auf die Sicherheit der technischen Anlagen. Den Bedarf dafür hat die Politik – gestützt auf seriöse Gutachten – definiert. Die Politik definiert auch den Bedarf, wenn Arbeitsplätze und Wirtschaftsstandorte durch die Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit der Häfen gesichert werden. Die Politik bestimmt, ob Containerschiffe der vierten Generation und künftig auch der fünften Generation die Häfen von Hamburg und Bremerhaven erreichen. Dies alles geschieht in einem Spannungsfeld unterschiedlicher Belange und Randbedingungen, die teilweise nicht disponibel sind, da sie physikalischen Gesetzmäßigkeiten unterliegen. Standort- und Umweltpolitik ist dann tragfähig,

wenn sie auf seriösen Daten und Fakten fußt und die naturgesetzlichen Wirkungszusammenhänge beachtet. Die Bundesanstalt für Wasserbau ist Garant für seriöse gutachterliche Zuarbeit.

Nicht erst seit den Katastrophenhochwässern des vergangenen Jahrzehnts haben die internationalen Flussgebietskommissionen umfangreiche Ausarbeitungen mit eindeutigen Darlegungen zur Kausalität von Niederschlag und Abfluss und mit ebenso eindeutigen Bewertungen der Maßnahmen zur Raumordnung und Wasserwirtschaft verfasst. Beschrieben sind die Wirkungen von Talsperren bis hin zur Flächen-Entsiegelung, ihre Kosten und Nutzen. Aufgezeigt sind dort das streckenweise mangelhafte Schutzniveau von Deichen und ihre mangelhafte Standsicherheit. Zu verzeichnen ist hier weniger ein Regelungsdefizit als vielmehr ein örtliches Handlungsdefizit. Dabei versteht sich von selbst, dass die Wirkungen der Hochwasserschutzmaßnahmen und die verkehrlichen Nutzungen von Gewässern integriert zu betrachten sind. Erlauben Sie an dieser Stelle auch den Hinweis, dass der Vergleich der Situation der Deiche der Länder die Vorgehensweise der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes zur Gewährleistung der Sicherheit ihrer ständig wasserbelasteten Dämme bestätigt hat.

Eine wissenschaftliche Anstalt wie die Bundesanstalt für Wasserbau ist in der Lage, alle abiotischen Faktoren zur Zielerreichung für Schifffahrt und Hochwasserabfluss zu untersuchen und genau zu beschreiben. Die Bundesanstalt für Wasserbau hat – bei allerdings begrenzter Kapazität – das Know-how, auch wasserbauliche und wasserwirtschaftliche Fragestellungen abzuarbeiten, die in der Aufgabenkompetenz der Länder liegen. Für abflussgebietliche Fragestellungen sei an dieser Stelle auch das Know-how der Bundesanstalt für Gewässerkunde ausdrücklich erwähnt. Die enge Zusammenarbeit beider Anstalten ist gängige und erfolgreiche Praxis.

Lieber Herr Dr.-Ing. Flügge, lange Jahre Ihres Berufslebens haben Sie Erfolg und Reputation in originär ökologisch verfassten Aufgabenstellungen gefunden. Nun finden Sie in der Spannweite und Besonderheit des Küsten-Verkehrswasserbaus weit über die Grenzen unseres Landes hinaus Anerkennung. Und Sie verknüpfen in nationalen und internationalen Gremien und in Abhandlungen abiotische und biotische Zusammenhänge. Ihre Ingenieurkunst ist es, die Wechselwirkungen zwischen Fluss- und Tidedynamik und fahrdynamischen Zuständen immer größerer Schiffstypen im begrenzten Fahrwasser zu quantifizieren. Dazu gehören Änderungen der abiotischen Ästuar Kenngrößen wie Strömungen, Schwebstoff- und Salzgehalt, Seegang, Veränderungen der Tidedynamik, der Wasserstände und Strömungen in Haupt- und Nebenwasserflächen, Wechselwirkungen von Strömung und Schiffsumströmung auf die Gewässersohle und auf die Ufer. Sie schaffen damit die Grundlagen für qualifizierte Umweltverträglichkeitsuntersuchungen, für qualifizierte Nutzen-Kosten-Untersuchungen und für politische Entscheidungen über den Ausbaubedarf. Sie tragen damit unverzichtbar dazu bei, dass die Abwägung aller Belange in den entscheidenden rechtsstaatlichen Genehmigungsverfahren auf einer tragfähigen Basis stattfinden kann. Mit Ihrer profunden naturwissenschaftlichen Bildung verstehen Sie es, lieber Herr Dr.-Ing. Flügge, komplizierte Zusammenhänge zu vermitteln; begeistert, temperamentvoll und überzeugend in der Ihnen eigenen wissenschaftlichen Souveränität. Mit großem Respekt ist Ihnen für Ihr großes bisheriges Lebenswerk zu danken, mit dem Sie zusammen mit Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern Basis für vernünftige Entscheidungen für die maritimen Standorte in Deutschland und weit darüber hinaus gelegt haben. Ich wünsche Ihnen Gesundheit und Glück für die Zukunft und ich bin dessen froh, dass Sie nach der heutigen Freistellung diesem Glück zuliebe Ihrer Berufung als Naturwissenschaftler weiterhin nachgehen werden. Herzlichen Dank.

Lieber Herr Dr.-Ing. Heyer!

Ich beglückwünsche Sie zur Übernahme der Leitung der Dienststelle Hamburg der Bundesanstalt für Wasserbau. Sie und alle Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Bundesanstalt für Wasserbau als einer naturwissenschaftlich verfassten Anstalt stehen im Dienste der Legitimationskette des Grundgesetzes. Dabei gilt für Sie in allen Ihren Aufgabebereichen unbeirrbar und unbestechlich allein die axiomatische naturwissenschaftliche Wahrhaftigkeit. Mögen Sie und die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der Bundesanstalt für Wasserbau, allein diesem Ethos verpflichtet, als qualifiziertes Team öffentlich wahrgenommen werden. Allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Bundesanstalt für Wasserbau wünsche ich weiterhin Anerkennung und Erfolg.

Grußworte im Namen der Wasser- und Schifffahrtsdirektionen Nord und Nordwest sowie der Wasser- und Schifffahrtsämter an der Küste

VPR WILFRIED RODIEK, DEZERNATSLEITER „REGIONALES MANAGEMENT“, WASSER- UND SCHIFFFAHRTSDIREKTION NORDWEST

Verehrte Anwesende, Sehr geehrter Herr Dr. Flügge,

mein erster persönlicher Kontakt zu Ihnen geht bereits auf annähernd 30 Jahre zurück. Ich lernte Sie 1974 am Franzius-Institut der TU Hannover kennen. Sie schrieben schon damals als wissenschaftlicher Angestellter Gutachten, während ich als „Hiwi“ Riffelforschung im Keller der Versuchshalle am Schneiderberg betrieb, sowie als Eintritt für die Teilnahme an der gemeinsamen Frühstücksrunde im sogenannten „Gartenhaus“ Tee und Kaffee für Sie und Ihre Kollegen zubereiten durfte. Jeder Tag in Ihrem Kreis war für mich ein besonderes Erlebnis, wenn ich daran denke, wie angeregt und immer von reichlich Flachserie begleitet Sie sich im Kollegenkreis fachlich austauschten und Ihnen anzumerken war, wie Sie es genossen, als junger Wissenschaftler das überlassene Handlungsfeld kreativ auszugestalten.

Der Kontakt zu Ihnen fand ca. 1984 unbewusst seine Fortsetzung, als sich hinter den Anfragen des Hamburger-Umweltsenators Curilla an Bundesverkehrsminister Dr. Dollinger zur Beseitigung von schadstoffbelasteten Sedimenten in den Buhnenfeldern der Elbe oberhalb des Wehres Geesthacht der Textverfasser Herr Dr. Flügge verbarg, und die Antwort unseres damaligen Ministers die Züge des Hilfsreferenten Rodiek trug.

In den 90er-Jahren hatten wir im Rahmen des 14 m-Ausbaus der Außenweser am intensivsten miteinander zu tun, als wir im Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven Sie und Ihre Mitarbeiter als unsere Gutachter schätzen lernen konnten.

Danach ist der berufliche Kontakt zu Ihnen auch in meiner jetzigen Tätigkeit als technischer Abteilungsleiter in der Wasser- und Schifffahrtsdirektion Nordwest nicht mehr abgerissen. Vor diesem Hintergrund habe ich es gerne übernommen, ein Grußwort der Kollegen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung an der Küste an Sie, Herr Dr. Flügge, anlässlich Ihrer heutigen Verabschiedung zu richten.

Meine Damen und Herren,
der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung hat man in der Vergangenheit gerne ein gewisses traditionsorientiertes Aufgabenverständnis nachgesagt. Wenn dies in der Sache jemals zugetroffen haben sollte, dann gilt das für die Praxis, dass sie gerne an Partnern festhält, die Gewähr für eine erfolgreiche Zusammenarbeit bieten. Hier weiß ich mich an der Küste mit den Kollegen aus der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung einig, dass die BAW, Dienststelle Hamburg (BAW-DH), seit langer Zeit eine solche geschätzte Adresse ist. Und ich verrate kein Geheimnis, wenn dieses viel mit dem Wirken des langjährigen Leiters der BAW-DH, mit Ihnen, Herr Dr. Flügge, zu tun hat.

Worin liegen die Ursachen und der Wert dieser erfolgreichen Kooperation ?
Zunächst einmal mangelt es der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung an der Küste nie an hochinteressanten Aufgaben. Sie alle dienen dem Ziel, mit leistungsfähigen Seeschifffahrtsstraßen einen Beitrag dazu zu leisten, den Seehafenstandort Deutschland für den internationalen Güteraustausch auf dem Seeweg attraktiv und wettbewerbsfähig zu erhalten. Die 80er- und 90er-Jahre und auch die Gegenwart prägen eine Vielzahl von Anträgen der Küstenländer an den Bund auf den Ausbau der Seeschifffahrtsstraßen. Vorhaben von der Ems über die Weser und Elbe bis hin zu den seewärtigen Zufahrten in der Ostsee warteten auf eine qualifizierte und zügige Planung und Umsetzung.

Die Wasser- und Schifffahrtsämter und beide WSDen an der Küste gaben und geben sich bei Ihnen, Herr Dr. Flügge, die Türklinke in die Hand, um bei der Langfristplanung und bei der Ausführungsplanung von Ausbauprojekten gutachterlich unterstützt zu werden. Aus meiner Zeit im Wasser- und Schifffahrtsamt Bremerhaven weiß ich noch zu gut, welche Anforderungen nicht nur wir, sondern auch alle anderen Dienststellen immer wieder an Sie richteten:

- Schnellstmögliche Aufnahme der Untersuchungen,
- unanfechtbare hydro-numerische Untersuchungsverfahren nach dem Stand der Technik, der bekanntermaßen dank immer leistungsstärkerer Rechner einer hohen Forschungsdynamik europa- und weltweit unterliegt,
- detaillierte analytische Ergebnisse, die eine überzeugende Antwort auf jede erdenkliche Fragestellung in dem Themenkomplex Hydrologie und Morphologie liefern sollen,

und natürlich, wie könnte es aus Auftraggebersicht anders sein,

- auch von der BAW eine vordringliche Bearbeitung des eigenen Projektes zu erwarten und demzufolge die Vorlage der gutachterlichen Ergebnisse möglichst „bis gestern“ zu erwünschen.

Wenn die Untersuchungen dann auch noch projektverträgliche Ergebnisse lieferten, so konnte das zwar kein Anspruch des Trägers des Vorhabens an die Gutachter sein; wir hatten aber auch nichts dagegen und waren erleichtert, wenn dann doch akzeptable oder besser gesagt, projektverträgliche Einschätzungen herauskamen.

In diesem Spannungsfeld haben Sie sich, Herr Dr. Flügge, mit Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern stets souverän bewegt. Den Spagat zwischen den Belangen und Zielen des Trägers des Vorhabens mit den dahinter stehenden hafen- und wirtschaftspolitischen Interessen der Küstenländer einerseits und dem Anspruch andererseits, sich fachlich fundiert und objektiv auch mit den nachteiligen Wirkungen solcher Ausbauprojekte auseinander zu setzen, haben Sie - sicher auch aus Sicht der Ausbaukritiker - bestens beherrscht. Vielzählige erfolgreich verlaufene Erörterungstermine liefern dafür jedenfalls eindeutigen Beweis. Hierbei bildeten gerade die Fragen der Auswirkungen eines Ausbaus auf die Tidekennwerte, auf die Morphologie oder auf die Salinitätsverhältnisse in Verbindung mit Schutzgütern wie der Ökologie, dem Küstenschutz oder den verschiedenen Nutzungen einen Schwerpunkt der planerischen, verfahrensrechtlichen und öffentlichen Auseinandersetzung. Will man hierauf überzeugende Antworten als unabdingbare Voraussetzung für die Realisierung eines Vorhabens geben, verlangt dies eine unbefangene und offene fachliche Auseinandersetzung auch mit den unvermeidlichen Kehrseiten eines Ausbaus. Kritische Aspekte nicht marginalisieren, sondern ihrer Bedeutung angemessen würdigen, die Belange des Umweltschutzes in ihrer grundsätzlichen Berechtigung ebenso ernst zu nehmen wie wirtschaftliche Gesichtspunkte, sowie nach Lösungswegen zur Überbrückung vermeintlicher Zielkonflikte suchen, waren zwar ein logischer und seit Anfang der 90er-Jahre im Zuge erweiterter Umweltgesetzgebung nachdrücklich legitimierter Anspruch, der aber dadurch nicht automatisch das Denken und Handeln aller Beteiligten „von heute auf morgen“ grundsätzlich verändern konnte.

Hier kommt Ihnen, Herr Dr. Flügge, und dies sicherlich auch im Zusammenwirken mit der Bundesanstalt für Gewässerkunde, ein großer persönlicher Verdienst zu. Auf einem ausgezeichneten fachlichen Fundament haben Sie sich auch mit kritischen ökologisch relevanten Fragestellungen ohne innere Vorbehalte auseinander gesetzt. Ihre Antworten waren verbindlich und glaubwürdig. Ungünstige Folgewirkungen eines Vorhabens haben Sie ebenso offen eingeräumt wie Sie entschieden unhaltbarer Kritik begegnet sind. Dies zeugte von fachlicher Souveränität und Glaubwürdigkeit. Es kommt deshalb

nicht von ungefähr, dass Sie nicht nur bei den Projekt-Befürwortern, sondern auch bei den Projektgegnern große fachliche Anerkennung und persönlichen Respekt erfahren.

Ihre gutachterliche Mitwirkung an den Ausbauvorhaben beschränkte sich aber nicht auf die Untersuchung der hydrologisch-morphologischen Veränderungen. Vielmehr lieferten diese Daten erst den Anstoß für die Frage, wie man nachteiligen Veränderungen mit geeigneten Maßnahmen begegnen kann. Gerade hier bewiesen Sie, Herr Dr. Flügge, großen Ideenreichtum, indem Sie wertvolle Vorschläge für flankierende Maßnahmen zur Verminderung nachteiliger Wasserstandsabsenkungen oder etwa zur Förderung ökologischer Effekte entwickelten. Beispielhaft sei nur Ihr Konzept für den letzten Elbe-Ausbau erwähnt, den vertiefungsbedingten Absink des Tideniedrigwassers gering zu halten, indem das Aushubbaggergut lagestabil in den Seitenräumen der Untereibe strombauwirksam untergebracht wird und als erwünschter ökologischer Nebeneffekt die für die Fischfauna so wertvollen Flachwasserzonen zusätzlich entstehen.

Wenn die zurückliegenden Ausbauvorhaben an der Küste erfolgreich geplant und ohne gerichtliches Nachspiel umgesetzt werden konnten, sowie eingetretene Projektwirkungen vorher gutachterlich verlässlich eingeschätzt wurden, so ist das auf Einflüsse zurückzuführen, die auch viel mit der Entwicklung der BAW unter Ihrer Leitung, Herr Dr. Flügge, zu tun haben.

Schon zu Beginn Ihrer Tätigkeit in der BAW haben Sie die wachsende Bedeutung der hydro-numerischen Verfahren für die Begutachtung hydrologischer und morphologischer Fragestellungen erkannt. Es zeugt von Ihrer geistigen Flexibilität und Ihren Personalmanagerqualitäten, wenn es Ihnen gelungen ist, innerhalb kürzester Zeit den eigenen Erfahrungshintergrund mit physikalischen Modellen „ad acta“ zu legen, ein Team aus kompetenten Numerikern um sich zu scharen und sich im Weiteren ausschließlich auf diese Berechnungsverfahren bei den gutachterlichen Untersuchungsaufträgen abzustützen. Die auf die praktische Gewässerkunde ausgerichteten WSÄ haben Sie dabei als unverzichtbare Partner angesehen und zwar nicht nur in Ihrer Eigenschaft als Lieferanten von Naturmessdaten zur Eichung und Steuerung des hydro-numerischen Modells sowie zu Beweissicherungszwecken, sondern auch in der wichtigen Funktion als Erfahrungsträger und regelmäßiger Beobachter und Auswerter der natürlich ablaufenden hydro- und morphodynamischen Prozesse in den jeweiligen Revieren. Sie, Herr Dr. Flügge, haben immer die Notwendigkeit zur Zusammenführung und zum Abgleich der Erkenntnisse aus der quantitativen Gewässerkunde und den strombaulichen Erfahrungen vor Ort mit den Ergebnissen der numerischen Modellläufe in der BAW erkannt und das intensive Gespräch mit den Ämtern gesucht. Dies war der Schlüssel zur gegenseitigen fachlichen Akzeptanz, hohen Kooperationsbereitschaft und zur beachtlichen Qualität der gutachterlichen Ergebnisse.

Damit wurden auch die Grundlagen für eine gute Zusammenarbeit auf der persönlichen Ebene zwischen der BAW und den WSV-Dienststellen geschaffen. Hierbei fiel auf, dass Sie sich, Herr Dr. Flügge, mit Ihrem Team bei den Ausbauvorhaben von der gleichen Begeisterung und einem ebensolchen Leistungswillen wie die Beteiligten der projektverantwortlichen Dienststellen in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung tragen ließen. Wenn es „brannte“ und der Fortschritt der Planung oder des Verfahrens insbesondere von Ihrem Beitrag abhing, setzten Sie für sich und Ihre Leute die Zeitregularien großzügig zu Gunsten längerer Arbeitszeiten außer Kraft. Dabei galten nach meinem Eindruck für Sie persönlich selbst verordnete verschärfte Bedingungen. Kundenorientierter hätte sich Ihre gesamte Dienststelle nicht einbringen können.

Mit den großen Ausbauvorhaben in den Seeschifffahrtsstraßen haben Sie, Herr Dr. Flügge, als Gutachter im Rahmen der Planfeststellungsverfahren eine weit beachtete Außenwirkung entfaltet und hohes fachliches Ansehen erfahren. Ihr wasserbauliches Herz schlägt aber auch für andere wichtige Themen des Verkehrswasserbaus, die

mehr nach innen gerichtet sind und auf die Optimierung der Unterhaltungsaufgaben in der WSV abzielen:

- Systematische Untersuchungen zum Squat-Effekt mit einem Schlepptank im physikalischen Modell,
- die Erfassung der physikalischen Eigenschaften von schlickigem Sohlmaterial als Grundlage für verbesserte Festlegungen zur „nautischen Sohle“ in den Seeschiffahrtsstraßen,
- Grundlagenuntersuchungen im hydro-numerischen Modell zum Einfluss eines Tidespeicherbeckens auf die Stärkung der Strömungsräumkraft in einem Tidefluss,
- Entwicklung von Strombaukonzepten und deren Bauwerksbemessung zur Reduzierung der Unterhaltungsbaggerungen,
- Modellierung und Quantifizierung morpho-dynamischer Prozesse im 3D-Modell

sind nur einige Beweise dafür, dass mit Ihnen, Herr Dr. Flügge, ein hochleistungsfähiger Antriebsmotor in einer Dienststelle tätig war, die so innovativ wie praxis- und bedarfsorientiert arbeitet. Die BAW-DH wird auch weiterhin vor anspruchsvollen Aufgaben stehen, die es im engen Zusammenwirken mit den Wasser- und Schifffahrtsämtern und den Wasser- und Schifffahrsdirektionen Nord und Nordwest erfolgreich zu bewältigen gilt.

Für die weite Streuung der fachwissenschaftlichen Ergebnisse sowie für den Erfahrungsaustausch zwischen Wissenschaftlern und Anwendern haben Sie mit den regelmäßigen Kolloquien einen hervorragenden Rahmen geschaffen, für den wir Ihnen sehr dankbar sind und für den uns selbst der Weg von Ostfriesland niemals zu weit sein wird.

Meine Damen und Herren,
Bilanzen und Würdigungen, z. B. anlässlich einer Verabschiedung, fallen schon mal etwas zu positiv aus; in diesem Fall bin ich mir sicher, dass meine Geschäftsbilanz Ihrer Arbeit, lieber Herr Dr. Flügge, auch von dem kritischsten Aufsichtsrat aus Vertretern der Küsten-WSDen und den Küsten-WSÄ ohne Abstriche bestätigt worden wäre. Die Konsequenz eines Aufsichtsrates wäre aber die dringende Empfehlung gewesen, diesen Herrn auf jeden Fall länger zu verpflichten. Wenn dies aus sehr nachvollziehbaren Gründen nicht dazu kommt und dies dennoch keinen Grund zur Unruhe gibt, dann deswegen, weil wir wissen, dass Ihnen, Herr Dr. Flügge, mit Herrn Dr. Heyer ein Kollege nachfolgt, der uns aus seiner bisherigen Arbeit nicht nur gut vertraut ist, sondern auch die Gewähr für eine weiterhin fachkompetente Arbeit der BAW-DH und einen engen Kontakt mit der WSV bietet.

Für Ihre ausgezeichnete und sehr engagierte Arbeit über alle Jahre Ihres Wirkens in der BAW sage ich Ihnen im Namen aller Dienststellen der WSV an der Küste ganz herzlichen Dank und ausdrückliche fachliche Anerkennung. Für den nächsten Lebensabschnitt wünsche ich Ihnen ein neues gutes Steuerungsmodell, das Sie sich vielleicht von Ihrer Frau programmieren lassen sollten. Dann bin ich mir ganz sicher und wünsche es Ihnen sehr, dass dieses Modell Sie mit einem ausgewogenen Mix aus familiären, kulturellen, sportlichen und - manchmal auch ingenieurfachlichen Freuden - durch einen intensiven Lebensabschnitt gemeinsam mit Ihrer Frau bei guter Gesundheit führen wird.

Ihnen, Herr Dr. Heyer, wünsche ich viel Freude und Erfolg in der neuen Funktion sowie eine glückliche Hand bei der Führung Ihrer Dienststelle. An der vertrauensvollen und konstruktiven Zusammenarbeit unserer WSV-Dienststellen mit der BAW-DH nunmehr unter Ihrer Leitung werden wir gerne und selbstverständlich festhalten. Alles Gute für die Zukunft!

Grußwort der Personalvertretung der Dienststelle Hamburg der BAW

DR.-ING. REINER SCHUBERT, VORSITZENDER DES ÖRTLICHEN PERSONALRATS

Verehrte Gäste, liebe Kolleginnen und Kollegen!
Sehr geehrter Herr Dr. Flügge,

im Namen der amtierenden Personalvertretung der Dienststelle Hamburg der BAW möchte ich Ihnen zu Ihrer Verabschiedung an dieser Stelle ein Grußwort überbringen.

Im Kreise des örtlichen Personalrates haben wir dieses Ereignis zum Anlass genommen, uns Gedanken darüber zu machen, welche Themen - speziell in den vergangenen drei einhalb Jahren unserer Zusammenarbeit - die Gemüter in den gemeinsamen Gesprächen erhitzt haben. Dabei fiel uns auf, dass dies nur in einigen wenigen Fällen auftrat und es dann häufig so war, dass wir uns zusammen mit Ihnen über eine Sache, die von außen in die Dienststelle hereingetragen wurde, geärgert haben.

Der Hauptgrund liegt unseres Erachtens darin, dass es zwischen Ihnen und der Personalvertretung immer ein sehr offenes Verhältnis gab. Wir wurden durch Sie immer frühzeitig über geplante Maßnahmen der Leitung der Dienststelle Hamburg und, soweit es notwendig und möglich war, über Maßnahmen der Leitung der BAW informiert. Auch haben Sie sich nie hinter vermeintlich vorhandene Sachzwänge versteckt, sondern standen stets zu Ihrer Meinung und haben argumentativ zu überzeugen versucht. Daher konnten wir geplante Maßnahmen aus Sicht der Personalvertretung bewerten und Ihnen auch schon im Vorfeld unsere Sichtweise darlegen. Das Leitbild der BAW gibt diese Art und Weise der Zusammenarbeit zwar vor, aber sie muss auch durch die handelnden Personen „mit Leben“ gefüllt werden. Sie, Herr Dr. Flügge, haben das in vorbildlicher Weise getan. Dafür möchten wir uns bei Ihnen recht herzlich bedanken.

Für Ihren weiteren Lebensweg wünschen wir Ihnen, dass Sie auch zukünftig Ihre Ziele verwirklichen können. Mit der Ihnen eigenen offenen Art auf Menschen zuzugehen und sich und andere Menschen zu motivieren, sollte Ihnen dies auch gelingen. Voraussetzung dazu ist aber auch Gesundheit und Freude an weiterer schöpferischer Arbeit, die wir in unsere Wünsche einschließen. Wir hoffen, dass wir Sie als „Ehemaligen der BAW“ noch recht lange sowohl auf Kolloquien und als auch auf betrieblichen Feiern der Dienststelle im Kreise der „BAW'ler“ begrüßen können.

Nochmals vielen Dank für die Zusammenarbeit in der Vergangenheit und alles Gute für die Zukunft.

**Beschreibung und Analyse
der Ästuardynamik
in den Seeschifffahrtsstraßen**

Ein Beitrag zur Tidedynamik der Unterems

DIPL.-ING. (FH) JENS JÜRGES, DR. RER. NAT. NORBERT WINKEL, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME II

Das Ems-Ästuar bildet den Unterlauf der Ems, der dem Gezeiteneinfluss der Nordsee sowie dem Oberwassereinfluss unterliegt. Das Gebiet des Ems-Ästuars (Bild 1) lässt sich in folgende Teilgebiete gliedern (BfG, 2001): Äußere Emsmündung, Osterems, Außenems, Emders Fahrwasser, Dollart, Unterems und Dortmund-Ems-Kanal sowie Leda-Jümme-Gebiet.

Im Küstenvorfeld der Nordsee vor den Inseln Borkum, Rottumeroog und Rottumerplaat liegt die Äußere Emsmündung. Die Osterems bildet den flacheren Mündungsarm der Ems östlich der Insel Borkum. Die nord-süd ausgerichtete Außenems erstreckt sich vom See-gat Ems bis zur Knock. Von der Knock bis zum Emders Vor- bzw. Außenhafen schließt sich das Emders Fahrwasser an. Für das Emders Fahrwasser sowie im weiteren Verlauf stromauf auch für die Unterems bis Pogum bildet der Geiserücken mit dem Geiseleitdamm die südliche Grenze zum Dollart, ein etwa 100 km² großes Becken. Die großen Wattflächen des Dollarts werden durch ein komplexes Prielsystem ent- und bewässert, das über das Grote Gat und den Gatjebogen mit der Außenems verbunden ist. Von Pogum bis Papenburg verläuft die Unterems, in die bei Leer die Leda mündet. Von Papenburg bis zum Wehr bzw. bis zum Schleusenvorhafen Herbrum wird der obere Teil des Ems-Ästuars Dortmund-Ems-Kanal genannt. Bei mittleren Abfluss- und Tideverhältnissen endet der Gezeiteneinfluss am Wehr Herbrum.



Bild 1: Das Ems-Ästuar (Original Data © Landsat 7 ETM, 15.07.2002, Distributed by Eurimage. Dataprocessing by Brockmann Consult). Die Farbe des Wassers gibt die Oberflächentrübung von hellbraun (hohe Trübung) bis schwarzblau (geringe Trübung) wieder.

Die Tideems ist als wichtige Bundeswasserstraße in den letzten 20 Jahren laufend den Bedürfnissen des Schiffsverkehrs angepasst worden (Bild 2). In diesem Zusammenhang sind die Ausbauten für das 5,70 m, 6,30 m und 7,30 m tiefgehende Werftschiff zu nennen. Hierbei ist die Unterems wegen des größeren Tiefganges der Schiffe vertieft worden, um eine Überführung neugebauter Werftschiffe von Papenburg in die Nordsee in einer sogenannten Zwei-Tidenfahrt mit Zwischenstop in Leerort zu ermöglichen. Im Rahmen dieser Ausbauten erfolgte u. a. eine Abflachung der Stapelmoorer Bucht, der Ausbau des Weekeborger Durchstichs, Fahrrinnenverlagerungen sowie Strombau durch neue Buhnen und Leitwerke. Gleichzeitig sind Begradigungen der Deichlinie entlang der Unterems durchgeführt worden. Mit der Indienststellung des Emssperrwerkes bei Gandersum im Jahre 2002 konnten an der Ems Belange des Küstenschutzes und der Schifffahrt verbessert werden. Durch das geschlossene Sperrwerk werden Sturmfluten mit Wasserständen, die höher als NN +3,70 m auflaufen, gekehrt und dringen nicht mehr flussaufwärts vor. In diesen Schutz gelangt auch das Leda-Jümme-Gebiet, das bislang durch das Ledasperrwerk vor Sturmfluten geschützt wird. Das Ledasperrwerk wurde 1954 in Betrieb genommen und entspricht hinsichtlich seiner Torkonstruktion nicht mehr den heutigen Sicherheitsanforderungen. Gleichzeitig besteht nun die Möglichkeit, zur Überführung von Schiffen mit einem Tiefgang bis 8,50 m, die Ems mit Hilfe des Sperrwerkes kurzzeitig anzustauen.

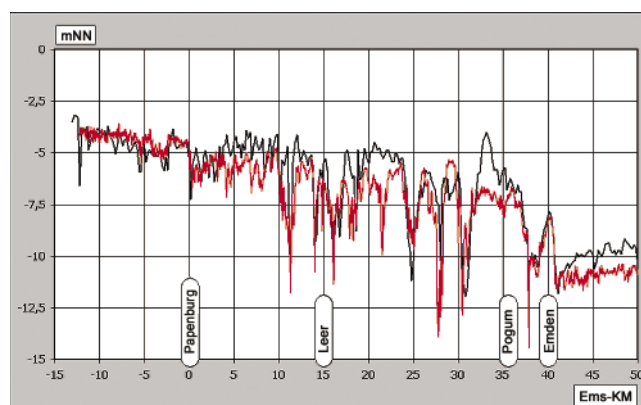


Bild 2: Sohlage des Emsfahrwassers (Fahrrinnenmitte) von Herbrum bis Dukegat für den Zustand im Jahre 1981 in Schwarz und in Rot für den Zustand 1998. Bezug Normal Null (NN).

Durch den Ausbau der Unterems hat sich die Tidedynamik in den letzten 20 Jahren stark verändert (BAW 1996). So stellte sich 1981 am Pegel Papenburg bei mittleren Tideverhältnissen und bei einem

Oberwasserzufluss der Ems von etwa $25 \text{ m}^3/\text{s}$ ein Tidehub von rd. $2,90 \text{ m}$ ein (Bild 3). Dagegen betrug 1998 der Tidehub rd. $3,70 \text{ m}$ bei vergleichbaren Verhältnissen. Die Veränderung des Tidehubes ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass das Tideniedrigwasser (Bild 4) ausbaubedingt sehr stark abgesunken ist. Als Folge der veränderten Tidedynamik hat sich in der Ems eine Asymmetrie der Tideprozesse in der Flut- und Ebbephase entwickelt, die zu einer ausgeprägten Flutstromdominanz (im Bild 5 bezogen auf die maximalen Strömungen) führte.

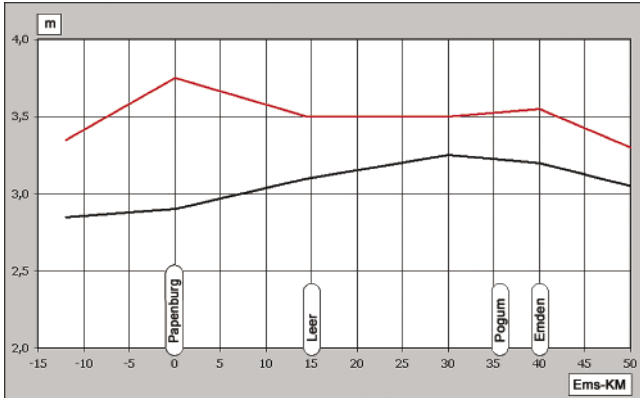


Bild 3: Schematisierte Darstellung des Tidehubes für 1981 in Schwarz sowie für 1998 in Rot bei mittleren Tideverhältnissen und bei einem Oberwasserzufluss der Ems von rd. $25 \text{ m}^3/\text{s}$.

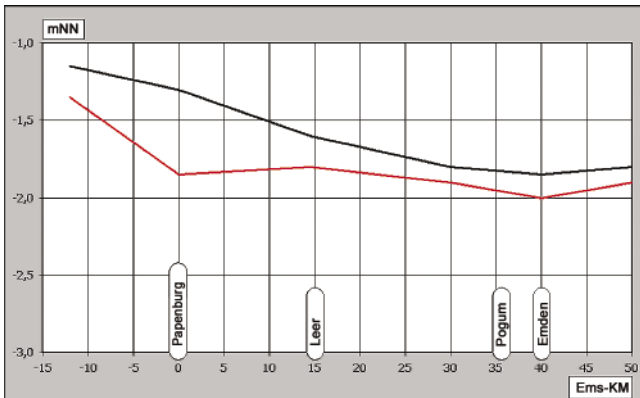


Bild 4: Schematisierte Darstellung des Tideniedrigwassers für 1981 in Schwarz sowie für 1998 in Rot bei mittleren Tideverhältnissen und bei einem Oberwasserzufluss der Ems von rd. $25 \text{ m}^3/\text{s}$.

Die Asymmetrie der Tidekurve (Wasserstandsverlauf) hat nicht nur die Amplitude der Tidewelle und den Anstieg des Wasserstandes insbesondere in der ersten Flutphase verändert, sondern auch die Laufzeit der Tidewelle. Die Veränderung in der Laufzeit der Tidewelle macht sich dadurch bemerkbar, dass die Unterschiede der Eintrittszeiten z. B. des Tidehochwassers von einem Pegel zum anderen abgenommen haben. Diese Abnahme entwickelte sich aber nicht erst durch die Ausbauten der Unterems, sondern schon lange vor 1981 (BAW 2000).

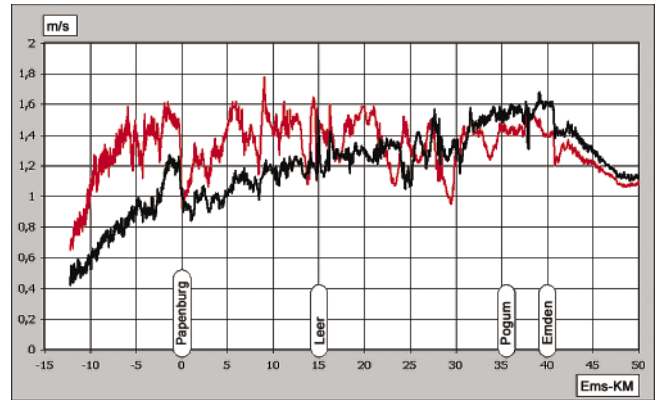


Bild 5: Die maximale Flut- (rot) und Ebbestromgeschwindigkeit (schwarz) für den topographischen Zustand 1998 bei mittleren Tideverhältnissen und bei einem Oberwasserzufluss der Ems von rd. $25 \text{ m}^3/\text{s}$. Diese von einem zweidimensionalen mathematischen Modell berechneten Geschwindigkeiten stellen die Mittelwerte über die Wassersäule in der Fahrrinnenmitte dar.

Um dies zu verdeutlichen sind exemplarisch für den Pegel Pogum die Eintrittszeitdifferenzen des Tidehochwassers bezogen auf den Pegel Papenburg für den Zeitraum 01/50 bis 12/95 in Bild 6 aufgetragen. Hierfür wurde jeweils für dieselbe Tide die entsprechende Eintrittszeit des Hochwassers am Pegel Pogum und am Pegel Papenburg ermittelt. Anschließend wurde die Differenz durch Subtraktion der Eintrittszeit

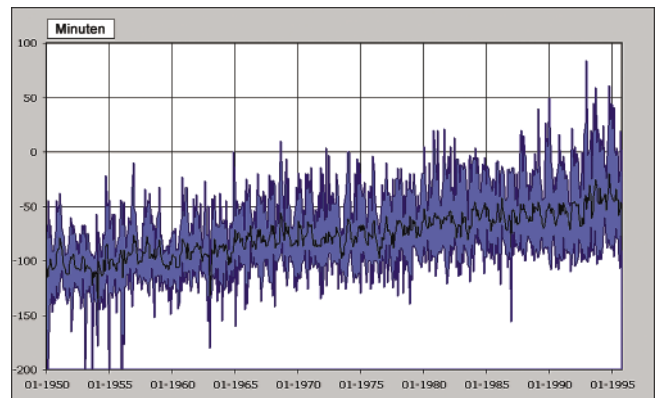


Bild 6: Die Eintrittsdifferenzen (in Minuten) des Tidehochwassers (blau) zwischen dem Pegel Pogum und dem Pegel Papenburg von 1950 bis 1995. Hierbei bilden die minimalen und maximalen Differenzen für jeden Monat die untere bzw. die obere Berandung (dunkelblau). Die schwarze Kurve in dem blauen Bereich stellt den monatlichen Mittelwert dar. Eine negative Differenz gibt an, um wie viele Minuten das Hochwasser in Pogum früher eintritt als in Papenburg. Ist die Differenz gleich Null bedeutet dies, dass das Hochwasser an den Pegeln zeitgleich eintritt. Ist die Differenz größer Null, tritt das Hochwasser in Papenburg früher ein als in Pogum (Eintrittszeitverspätung).

am Pegel Pogum von der am Pegel Papenburg berechnet. Die minimalen und maximalen Eintrittszeitdifferenzen für jeden Monat bilden die untere bzw. die obere Berandung der Menge aller Eintrittszeitdifferenzen, die in blau aufgetragen ist. Die schwarze Kurve in dem blauen Bereich stellt den monatlichen Mittelwert dar. Eine negative Differenz gibt an, um wie viele Minuten das Hochwasser in Pogum früher eintritt als in Papenburg. Ist die Differenz gleich Null bedeutet dies, dass das Hochwasser an den Pegeln zeitgleich eintritt. Ist die Differenz größer Null, tritt das Hochwasser in Papenburg früher ein als in Pogum (Eintrittszeitverspätung). Es ist deutlich eine kontinuierliche Abnahme der Eintrittszeitdifferenzen zu sehen. Während 1950 das Tidehochwasser in Pogum im Monatsmittel ca. 100 Minuten früher als in Papenburg eintrat, liegt dieser Wert 1995 bei ca. 50 Minuten.

Wird das Tidehochwasser als der Kamm einer Welle angesehen, grenzt es sicherlich an ein Wunder, dass der Wellenkamm früher am Ende eines Weges zu sehen ist als davor. Erklärbar wird dieses Phänomen dadurch, dass die Tidewelle keine Einzelwelle ist, sondern sich aus vielen Teilwellen, den sogenannten Partialwellen oder Partialtiden, zusammensetzt. Die Partialtiden der Gezeiten des Meeres werden im Wesentlichen durch die Wirkungen der orts- und zeitabhängigen Gravitationskräfte von Sonne und Mond sowie der Rotation der Erde bestimmt. Neben den astronomischen Einflüssen, welche die Hauptfrequenzen der Gezeiten bestimmen, treten insbesondere in den Flachwassergebieten der Schelfmeere und küstennahen Meeresbereiche zusätzliche Partialwellen auf, die Linearkombinationen der Hauptfrequenzen sind und deren Entstehung (in der Regel) ausschließlich den nichtlinearen dynamischen Prozessen zugeschrieben werden kann. Die nichtlinearen dynamischen Prozesse bestimmen die Amplitude und die Phasenlage der Partialtiden. Das Amplitudenverhältnis und die Phasenlage der Partialtiden untereinander bestimmen wiederum den Einfluss auf die Gezeitenwelle.

Ändern sich die nichtlinearen dynamischen Prozesse, ändert sich damit auch die Konstellation der Partialtiden untereinander. Dies kann zu einer Vorverlagerung der Phasenlage des Maximums (Tidehochwasser) der aus den Partialtiden zusammengesetzten Tidewelle führen, sodass das Tidehochwasser z. B. eher in Papenburg eintritt als in Pogum.

Eine mögliche Ursache dieses Phänomens kann eine plötzliche Änderung der Sohlrauheit sein, die über die Bodenreibung (dynamischer Prozess) das Amplitudenverhältnis und die Phasenlage der Partialtiden beeinflusst. Der hohe Schwebstoffgehalt der Ems führt zu hohen Konzentrationen von feinkörnigem

Material (Schlick) an der Sohle. Dieses durch die bodennahe Strömung in Bewegung gesetzte Material setzt der Strömung weniger Widerstand entgegen als grobes konsolidiertes Material. Dadurch bildet sich im Wasserkörper kein typisches Geschwindigkeitsprofil mehr aus, sondern das Wasser kann mit größeren Strömungsgeschwindigkeiten auf dem Schlick gleiten.

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass die Tidekurve im Bereich des Emders Fahrwasser und der Unterems asymmetrisch verformt ist. Diese Verformung nimmt nach stromauf zu. Die Flutdauer ist verkürzt (folglich Ebbdauer verlängert) und die Steiggeschwindigkeit des Wasserstandes ist insbesondere in der ersten Flutphase erhöht. Durch die Asymmetrie der Tideprozesse in der Flut- und Ebbe-phase ist in der Ems eine ausgeprägte Flutstromdominanz entstanden. Diese Dominanz wird durch den Dichtegradienten in der Brackwasserzone gestärkt. Die Flutstromdominanz, die aus verkürzter Flutstromdauer und hohen Steiggeschwindigkeiten des Wasserstandes in der ersten Flutphase resultiert, führt in der Feststoffbewegung zu einem größeren Übergewicht der Transporte in der Flutstromphase gegenüber der Ebbestromphase. Durch das zeitweilig auftretende Phänomen der Eintrittszeitverspätung (s. o.) des Tidehochwassers wird dieser Effekt noch verstärkt. Denn in dieser Zeit kann beobachtet werden, dass der Tidehub durch Absinken des Tideniedrigwassers größer wird und gleichzeitig die Flutstromdauer abnimmt (BAW 2000). Dies führt zu sehr großen Flutstromgeschwindigkeiten. Die Ems hat folglich das Bestreben, die Feststoffe unablässig periodisch stromauf zu pumpen. In der vergangenen Jahrzehnten hat sich durch die Veränderung der Tidedynamik und den damit gekoppelten Transportprozessen das System Ems mehr und mehr mit Feststoffen „aufgeladen“ (Bild 1).

Literaturverzeichnis

BAW (1996): Gutachten zur Beweissicherung – Änderung der Tidedynamik – Bedarfsweise Vertiefung der BWS Ems an das 5,70 m tiefgehende Bemessungsschiff. Gutachten BAW 98 53 3455, Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste. Unveröffentlicht.

BAW (2000): Verifikation des Emsmodells sowie die Analyse und Synthese des Wasserstandes in der Unterems. Sachstandsbericht BAW 93 53 3390, Bundesanstalt für Wasserbau - Außenstelle Küste. Unveröffentlicht.

BfG (2001): Bagger- und Klappstellenuntersuchungen im Ems-Ästuar – Klappstellen 1 bis 7 -. BfG-1329, Bundesanstalt für Gewässerkunde, Koblenz.

zu Berlin veröffentlicht. Darin schreibt Hagen über seine Beobachtungen von Ebbe und Flut in der Nähe des heutigen Wilhelmshaven folgendes:

„Es ergibt sich hieraus, daß die Dauer der Fluth etwas länger, als die der Ebbe ist und zwar nach diesen Beobachtungen um 8,6 Minuten. Der Schenkel der Fluth ist von dem der Ebbe besonders in der Nähe des Scheitelpunktes merklich verschieden, indem die Fluth in gleichem Abstände von letzterem viel langsamer steigt, als die Ebbe fällt. Wahrscheinlich rührt dies von den ausgedehnten Wattgründen in dem Bassin der Jade her, die eine schnelle Ausgleichung des Wasserspiegels verhindern. Gegen Ende der Fluth ergießen sich deshalb noch große Wassermassen über diese Untiefen, während beim Beginne der Ebbe dieselben nicht schnell genug abfließen können, und es dadurch möglich machen, daß der Wasserstand vor dem Pegel anfangs stärker sinkt. Dieser Mangel an Symmetrie zeigt

sich ohne Ausnahme und zwar in gleichem Sinne in allen Beobachtungsreihen.“

Im Grundsatz ist diese Beschreibung auch heute noch zutreffend. Die Dauer der Flut übersteigt diejenige der Ebbe (siehe Bild 2). Dieses Verhalten stellt eine Besonderheit im Systemverhalten der Jade dar, die in den benachbarten Ästuaren von Elbe, Weser und Ems nicht beobachtet werden kann. Dort ist die Ebbedauer zumeist deutlich größer als die Flutdauer. Auch ist in dem vorgenannten Bild der verlangsamte Stieg vor Thw und der im Vergleich dazu raschere Abfall nach Thw gut zu erkennen (siehe z. B. Tidekurve „Eingang Jadebusen“), also genau so, wie es von Hagen vor ca. 150 Jahren beobachtet und beschrieben wurde. Bild 2 zeigt darüber hinaus auch, dass die dort dargestellten, aus einem HN-Modell ermittelten Tidekurven in Übereinstimmung mit den Beobachtungen sind.

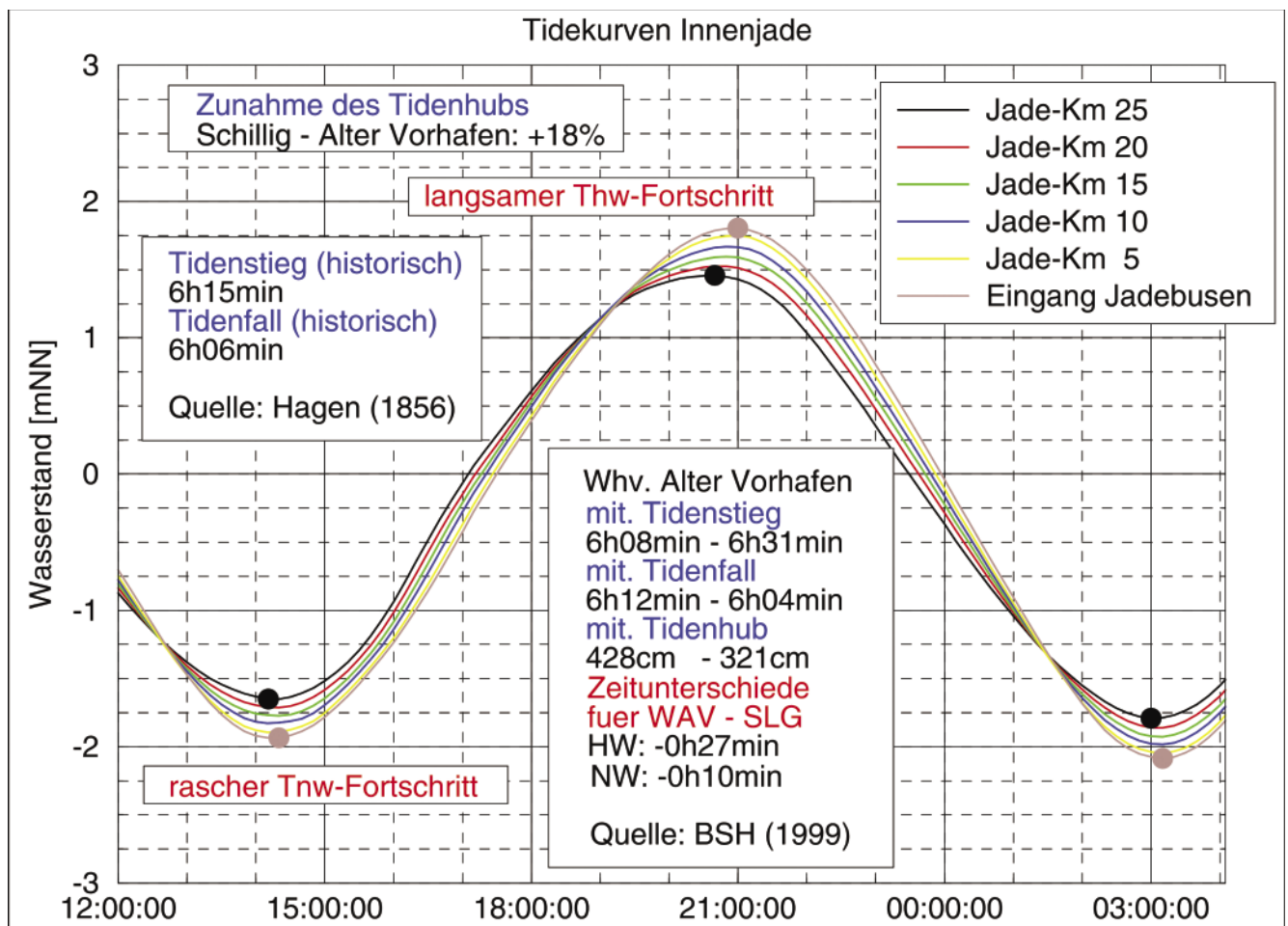


Bild 2: Mit einem HN-Modell des Jade-Weser-Systems berechnete Tidekurven für verschiedene Positionen entlang des Fahrwassers der Innenjade (Jade-km 25 bis Eingang Jadebusen). Die Tnw-Zeiten weichen in der Innenjade nur um wenige Minuten voneinander ab: Das Tnw tritt damit in der Innenjade fast zeitgleich ein (rascher Tnw-Fortschritt). Demgegenüber weisen die Thw-Zeiten größere Unterschiede auf (langsamer Thw-Fortschritt). Diese Kombination bewirkt, dass am südlichen Ende der Innenjade (Eingang Jadebusen) die Flutdauer größer als am nördlichen Anfang der Innenjade (Jade-km 25) und sogar größer als die Ebbedauer ist. Der Tidenstieg flacht daher bei Annäherung an den Jadebusen ab, während der Tidefall zunehmend steiler wird. In den zurückliegenden Jahrzehnten hat sich „dieser Mangel an Symmetrie“ im Vergleich zu Zeiten Hagens weiter verstärkt.

Überströmen des Hohe Weg Watts

Der frühere Gewässerkundler G. Frels des Wasser- und Schifffahrtsamtes Wilhelmshaven schreibt in seiner „Sammlung gewässerkundlicher Daten aus der Jadebucht und angrenzenden Bereichen“ aus dem Jahre 1995: „... *Dauerstrommessungen auf dem Watt im Jahre 1986 [gemeint ist hier das Hohe Weg Watt] deckten die Überströmung einer beträchtlichen Wassermenge von der Jade zur Weser auf. ... Je Tide strömen rd. 20 Mio m³ des Jadewassers in den Fedderwarder Priel und von hier in die dortigen Wattgebiete und die Weser. ... Sobald die Höhe der morphologischen Watscheide erreicht ist ... beginnt die Überströmung mit i.M. 10 cm/s ...*“

Diese Beobachtungen wurden mittlerweile sowohl qualitativ als auch quantitativ von verschiedenen HN-Modellen des Jade-Weser-Systems bestätigt. Bild 3 (für den Reststrom) und Bild 4 (für den Durchfluss) zeigen dieselben Phänomene anhand verschiedener Analyse- daten, die aus HN-Modell-Ergebnissen abgeleitet wurden.

Im Gegensatz zu der erst spät erkannten residuellen Überströmung des Hohen Weges, war das mit jeder Tide in den Jadebusen hinein und wieder heraus strömende Wasservolumen schon früh mit erstaunlicher Präzision bekannt. Diese Größe war und ist von entscheidender Bedeutung für Bestand und Unterhalt des Jadedefahrwassers. So schreibt z. B. schon Hagen in seinem 1856 erstellten, oben genannten Gutachten: „*Der Jade-Busen, soweit er bei gewöhnlichen Fluthen mit Wasser angefüllt wird, nimmt gegenwärtig eine Fläche von 3¹/₈ preußischen Quadratmeilen ein. Das gewöhnliche niedrige Wasser bedeckt in ihm dagegen noch nicht einmal eine halbe Quadratmeile. Am Ende der Ebbe ist eine Fläche nahe 2³/₄ Meilen groß, ein unzugänglicher Sumpf, der aus weichem Schlamm besteht. Indem der Fluthwechsel über 11 Fuß beträgt, so läßt sich übersehen, welch große Wassermasse bei jeder Fluth aus dem Meere diesem Busen zuströmt, und bei jeder Ebbe wieder zurückfließt. Hieraus erklärt es sich, daß der Schlauch der äußern Jade, in welchem diese Strömung erfolgt, wenn derselbe auch nicht regelmäßig begrenzt und sogar über 5 Meilen lang ist, dennoch in einer großen Breite und Tiefe sich dauernd erhält.*“

In seinem „Gutachten über die Erhaltung des Fahrwassers der Jade“ aus dem Jahre 1899 gibt H. Lentz für dieses Volumen als präzisen Wert 413.850.000 m³ an. Aus den Ergebnissen moderner HN-Modelle ergeben sich folgende vergleichbaren Werte: Für den in Bild 4 dargestellten Zeitraum liegt der Mittelwert für das Tidevolumen des Jadebusens bei 416.790.000 m³, wobei minimal 359 Mio m³ und maximal 495 Mio m³ hin-

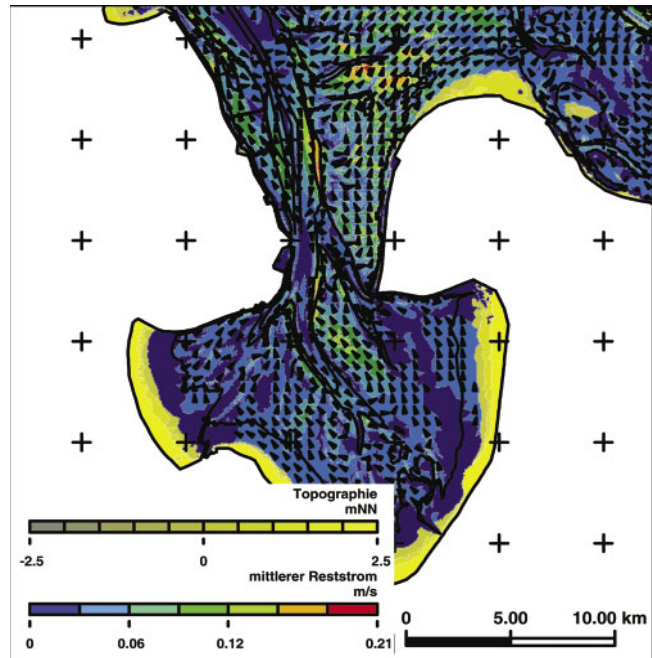


Bild 3: Aus den Ergebnissen eines HN-Modells für mehrere Tiden ermittelter Eulerscher Reststrom. Über dem Hohe Weg Watt ist die mittlere Überströmung von der Jade zur Weser zu erkennen. Die Größe des Reststroms stimmt mit den von Frels (1995) aus Messungen abgeleiteten Werten (ca. 10 cm/s) überein.

und herströmen. Diese Übereinstimmung mit der von H. Lentz angegebenen Zahl zeigt, dass das Tidevolumen des Jadebusens in den vergangenen 100 Jahren praktisch unverändert geblieben ist (Hinweis: Die Lage der Querprofile ist in Bild 5 dargestellt).

Mäandern der Strömung

„In Innenjade und Jadebusen folgen Flut- und Ebbestrom streckenweise getrennten Trassen. Der Flutstrom prägt in 1. Linie die Mäanderung ...“ So schreibt G. Frels in seiner schon zuvor zitierten Arbeit aus dem Jahre 1995. Und weiter heißt es dort: „Für die Aufdeckung der unterschiedlichen Fließwege von Ebbe und Flut wurden Dauerstrom-Meßgeräte eingesetzt.“ Die Beobachtungsergebnisse erklären sich aus dem Zusammenwirken verschiedener physikalischer Effekte (Massenträgheit, Coriolis-Beschleunigung) in Wechselwirkung mit der Jade-Topographie. Als Folge stellt sich eine von Ort zu Ort variierende Ungleichheit zwischen dem Flut- und dem Ebbestrom ein. Dieses Phänomen kann durch eine geeignete Analyse von HN-Modell-Ergebnissen sichtbar gemacht werden (siehe Bild 6). Die Analyseergebnisse bestätigen die von G. Frels in dessen Anlage 20 festgehaltenen Grundzüge des Mäanderns der Strömung, zeigen aber bezüglich der Ungleichheit zwischen Flut- und Ebbestrom weit mehr Details.

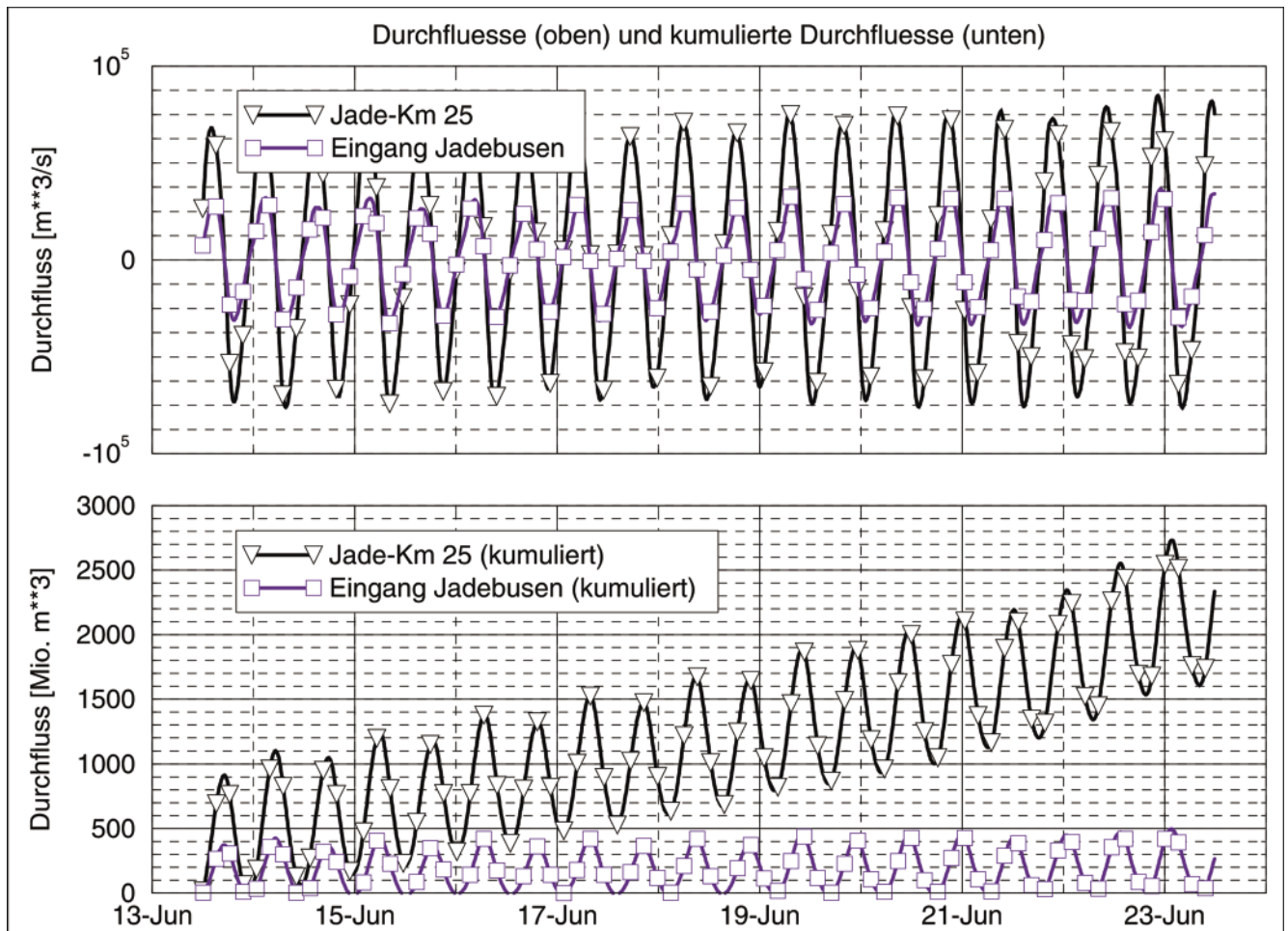


Bild 4: Die dargestellten Kurven wurden aus den Ergebnissen eines HN-Modells des Jade-Weser-Systems abgeleitet. Der Einfluss des Windes auf Wasserstand und Strömung wird darin nicht berücksichtigt. Oben: Durchfluss am nördlichen (Jade-km 25) und südlichen Ende (Eingang Jadebusen) der Innenjade. Man erkennt u. a., dass am Eingang zum Jadebusen noch ca. 50 % der durch den Querschnitt Schillig–Alte Mellum (Jade-km 25) strömenden Wassermenge zur Verfügung steht. Ein sehr großer Anteil, insbesondere wenn man bedenkt, dass es von dort nur noch ca. 15 km bis zum Ende der Jade (Küstenlinie des Jadebusens) sind. Unten: Kumulierte Durchflüsse auf den beiden zuvor genannten Querschnitten. Es ist ersichtlich, dass durch den Eingang zum Jadebusen in jeder Tide im Mittel etwas mehr als 400 Mio m³ hinein und auch wieder hinaus strömen (416.790.000 m³). Dies ist in sehr guter Übereinstimmung mit dem schon von H. Lentz (1899) angegebenen Wert von 413.850.000 m³. Da alles in den Jadebusen hinein strömende Wasser auch wieder heraus fließt, weisen die kumulierten Durchflussmengen für diesen Querschnitt keinen Trend auf. Im Gegensatz dazu wächst das über einen Zeitraum von mehreren Tiden kumulierte Wasservolumen auf dem Querschnitt Schillig–Alte Mellum kontinuierlich an. Dies ist ein Ausdruck für die resultierende Überströmung des Hohen Weges von der Innenjade zur Weser hin. In jeder Tide gehen der Innenjade auf diesem Wege ca. 50 Mio m³ verloren. Dieser Wert ist damit etwas größer als der von G. Frels aus Messungen abgeleitete Wert von 20 Mio m³/Tide.

Reflexion der Tidewelle

Neben den aus der Nordsee einlaufenden Gezeiten, Oberwasser und Wind sowie der Dissipation der vorhandenen Energie, ist die Reflexion der einlaufenden Gezeitenwelle einer der Prozesse, der den Tidecharakter eines Ästuars oder einer Bucht wie der Jade entscheidend beeinflussen. Im einfachsten Fall haben wir es mit einer einlaufenden und einer zweiten, am Ende des Ästuars total reflektierten, auslaufenden Welle zu tun. In der Realität ist die Situation natürlich deutlich komplizierter, da sich in der Regel verschiedene Teilwellen überlagern. Verallgemeinert gilt, dass die in einem Querschnitt vorhandene Energiedichte (potenzielle und kinetische Energie E_k und E_p) sich aus der Summe

aller ein- und auslaufenden Wellen zusammensetzt. Der ehemalige Leiter der Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, H. Krey, hat dies in den 1926 erschienenen Mitteilungen dieser Vorläuferinstitution der BAW in seinem Beitrag „Die Flutwelle in Flussmündungen und Meeresbuchten“ in folgender Weise formuliert: „In den beiden Werten E_k und E_p haben wir das ganze Arbeitsvermögen der Flutwelle, wie es in der Flutkurve eines Ortes in die Erscheinung tritt. ... In der frei und ungehindert einseitig verlaufenden Welle [eine harmonische Welle mit kleiner Amplitude (lineare Wellentheorie)] sind die beiden Energiewerte, der Arbeitsvorrat der Lage E_p und der Arbeitsvorrat der Bewegung E_k einander (ungefähr) gleich. Bei den natürlichen Flutwellen an unseren Küsten ist das aber durchaus nicht

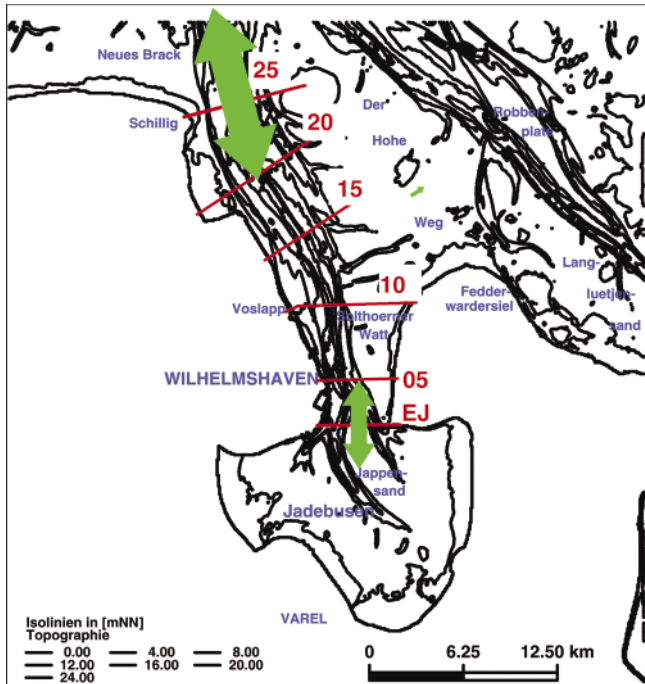


Bild 5: Lage verschiedener Querprofile zwischen Jade-km 25 und Jade-km 5 sowie am Eingang zum Jadebusen (EJ). Zusätzliche schematische Darstellung des Tidestromvolumens am Eingang zur Innenjade bzw. zum Jadebusen. Ferner die Überströmung des Hohe Weg Watts (sehr kleiner grüner Pfeil). Annähernd 50 % des durch den Querschnitt bei Jade-km 25 hindurch tretenden Tidestromvolumens ($900\text{--}1000\text{ Mio m}^3$) ist auch noch am Eingang zum Jadebusen vorhanden (ca. 400 Mio m^3), während etwa 5 % (ca. 50 Mio m^3) über den Hohen Weg zur Außenweser abgezweigt werden.

der Fall, weil sie hier infolge des Durcheinanderlaufens sehr vieler durch Teilung und Rückprall (Reflektion) usw. entstandener Wellen so verändert sind, daß bald die eine, bald die andere Arbeitsform überwiegt.“ Die von der Tidewelle in einem Querschnitt übertragene Energie wird als Übertragungsleistung bzw. –arbeit E_A bezeichnet. Sie ist daher insbesondere von der Art der Überlagerung der ein- und auslaufenden Welle(n) abhängig. Zunächst sollen die beiden einfachsten Konstellationen zweier harmonischer, gegenläufiger Wellen betrachtet werden: Bild 7 zeigt den Verlauf von Wasserstand, Strömung und Übertragungsleistung im reibungsfreien Fall, während in Bild 8 die reibungsbehaftete Situation dargestellt wird. Zur praktischen Bewertung der in einem Querschnitt vorhandenen Situation kann daraus folgende (altbekannte) Aussage abgeleitet werden: je näher die Strömungskenterung bei Thw oder Tnw liegt, um so größer ist der Anteil der Energie der reflektierten Welle an der Gesamtenergie im jeweiligen Querschnitt.

In der Jade liegen die Kenterpunkte der Strömung nahe bei Thw bzw. Tnw, sodass schon von daher auf einen hohen Anteil der reflektierten Welle an der Gesamtenergie geschlossen werden muss. Durch die aus

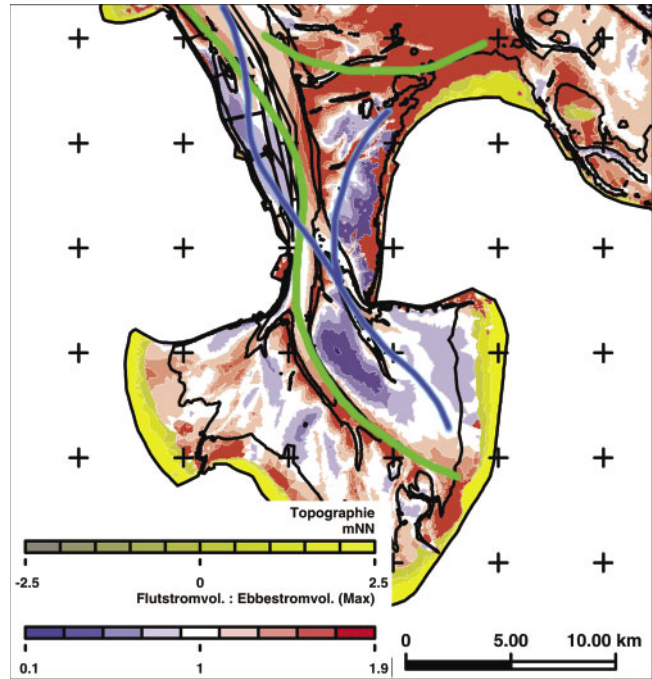


Bild 6: Mäandern von Flut- und Ebbestrom in der Innenjade. Dargestellt wird der aus den Ergebnissen eines HN-Modells abgeleitete Verhältniswert zwischen dem Flutstrom- und dem Ebbestromvolumen. Rot kennzeichnet eine Asymmetrie zu Gunsten des Flutstroms, blau zu Gunsten des Ebbestroms. Entlang der überlagerten, mäandertförmig in Nord-Süd-Richtung verlaufenden grünen Linie dominiert der Flutstrom. Entlang der eher geradlinig von Südsüdost nach Nordnordwest ziehenden blauen Linie dominiert hingegen der Ebbestrom. Beides bestätigt die im Text zitierten Beobachtungen G. Frels (1995), dass Flut- und Ebbestrom einen teilweise unterschiedlichen Verlauf nehmen. Des weiteren tritt das Hohe Weg Watts markant als flutstromdominiertes Gebiet hervor. Die dort erkennbare Flutdominanz ist ein Ausdruck der von der Innenjade zur Außenweser gerichteten Überströmung (siehe nochmals Bild 3). Bemerkenswert ist zusätzlich die Dominanz des Ebbestroms auf dem Solthorner Watt (gegenüber von Wilhelmshaven), über das größere Teile des aus dem Jadebusen abfließenden Wassers abgeführt werden.

HN-Ergebnissen abgeleiteten Daten für die Übertragungsleistung der Tidewelle kann diese Aussage für die Innenjade und den Jadebusen bestätigt werden (siehe Bild 9). Es ist ersichtlich, dass in allen Querschnitten, also auch noch bei Jade-km 25, der Anteil der rücklaufenden Energie hoch ist. Zum Jadebusen hin nimmt dieser Anteil (erwartungsgemäß) zu. Auffällige Diskontinuitäten sind nicht zu erkennen. Der hohe Anteil rücklaufender (reflektierter) Energie ist gleichbedeutend damit, dass in Innenjade und Jadebusen insgesamt wenig Energie dissipiert wird. Insbesondere stellt der Jadebusen ein Gebiet geringer Energiedissipation dar.

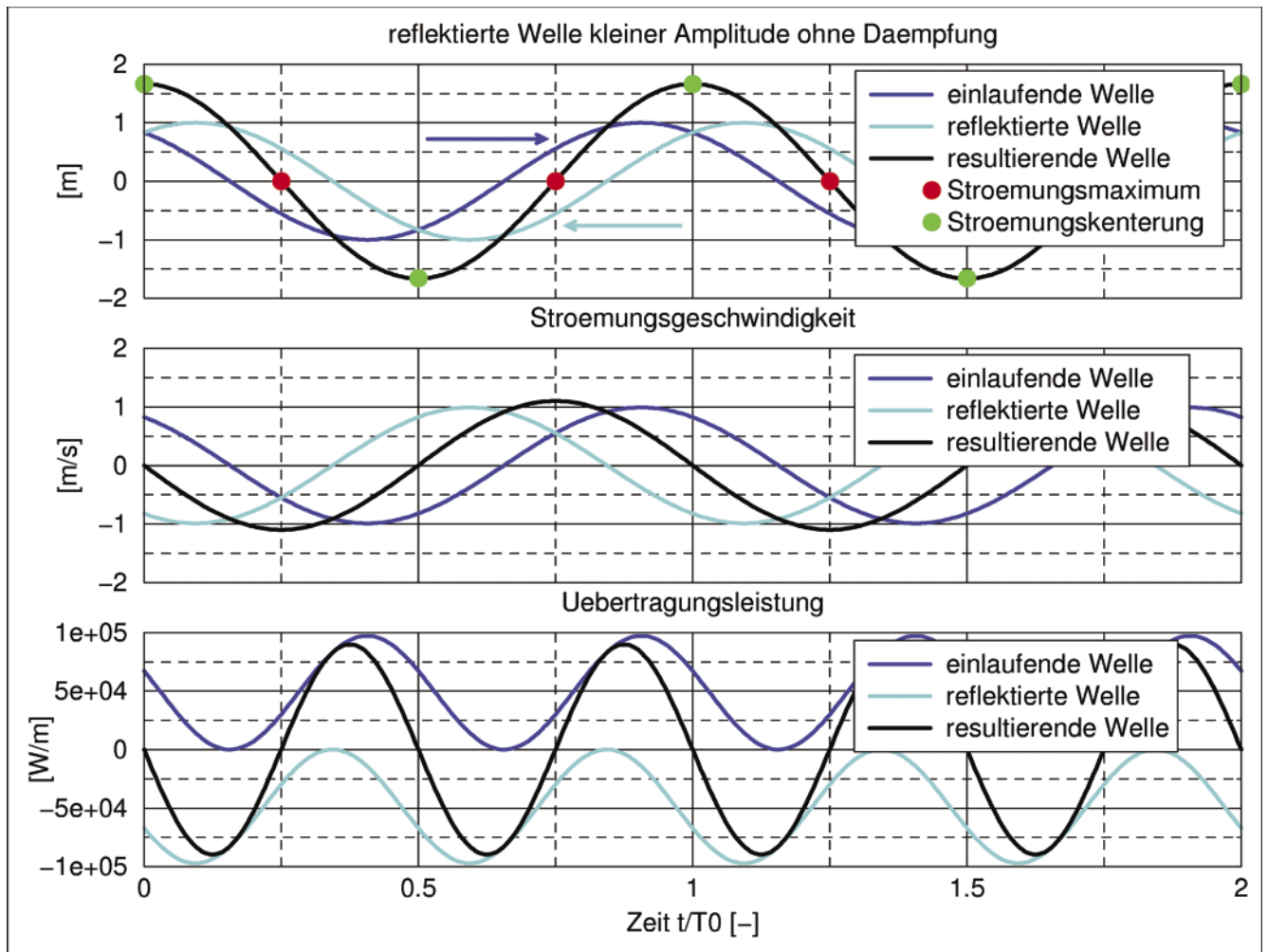


Bild 7: Zeitlicher Verlauf von Wasserstand, Strömung und Übertragungsleistung in einem reibungsfreien System an einem Ort. Einlaufende und reflektierte Welle besitzen dieselbe Amplitude. Die resultierende Übertragungsleistung ist Null, da beide Wellen dieselbe Energie, allerdings in verschiedene Richtungen, übertragen. Die Stromkenterpunkte stimmen mit T_{hw} und T_{nw} überein, während die Strömungsmaxima bei Mittelwasser liegen.

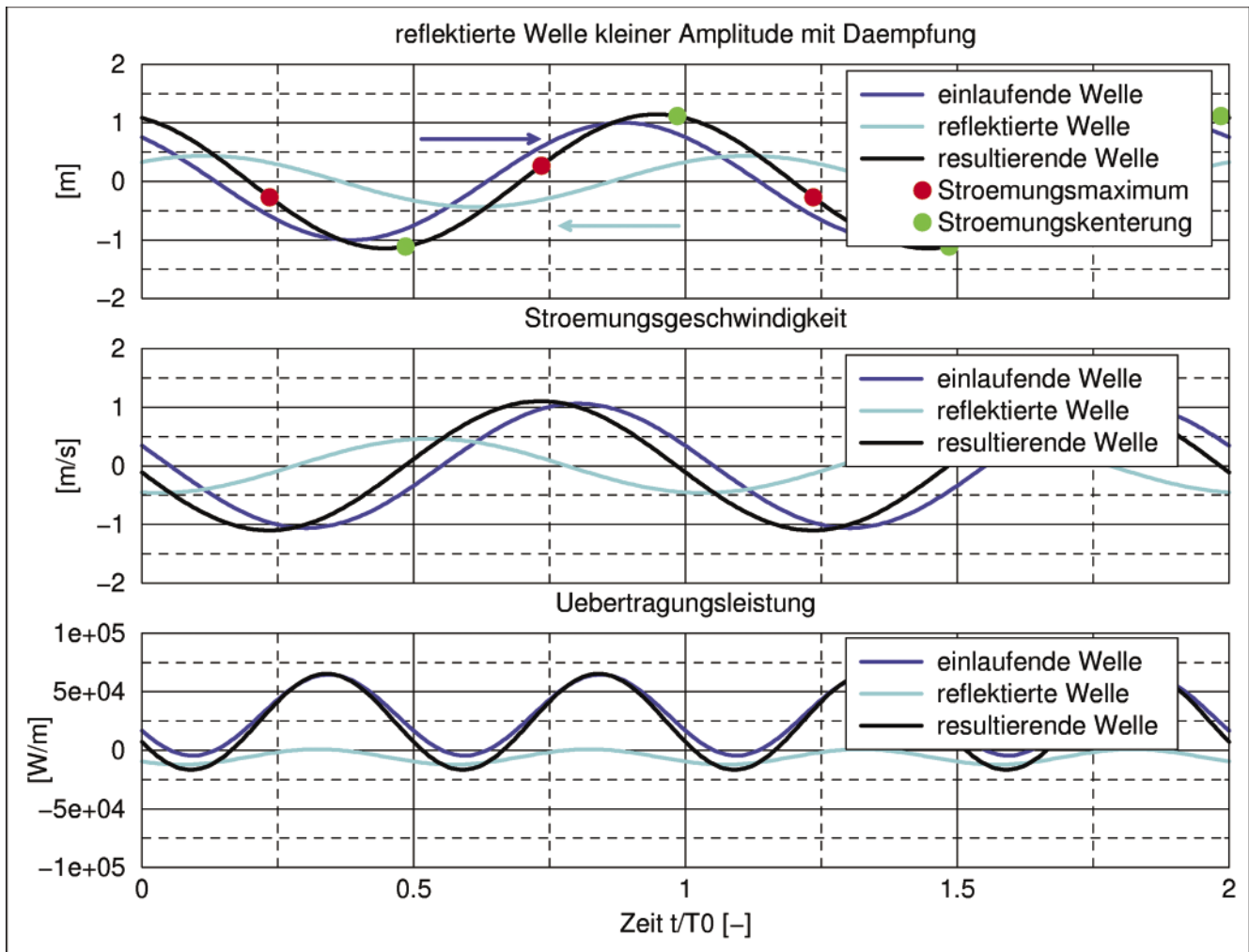


Bild 8: Zeitlicher Verlauf von Wasserstand, Strömung und Übertragungsleistung in einem reibungsbehafteten System an einem Ort. Die Amplitude der einlaufende Welle ist größer als diejenige der reflektierten Welle (Reibungseinfluss). Daher übersteigt die Übertragungsleistung der einlaufenden die der auslaufenden Welle. Im zeitlichen Mittel wird also Energie in Richtung der einlaufenden Welle übertragen. Die Strömungskenterung erfolgt zeitlich jeweils nach dem Thw bzw. nach dem Tnw. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit tritt jeweils in der zweiten Hälfte der Ebbe- bzw. Flutphase, also jeweils nach Mittelwasser auf.

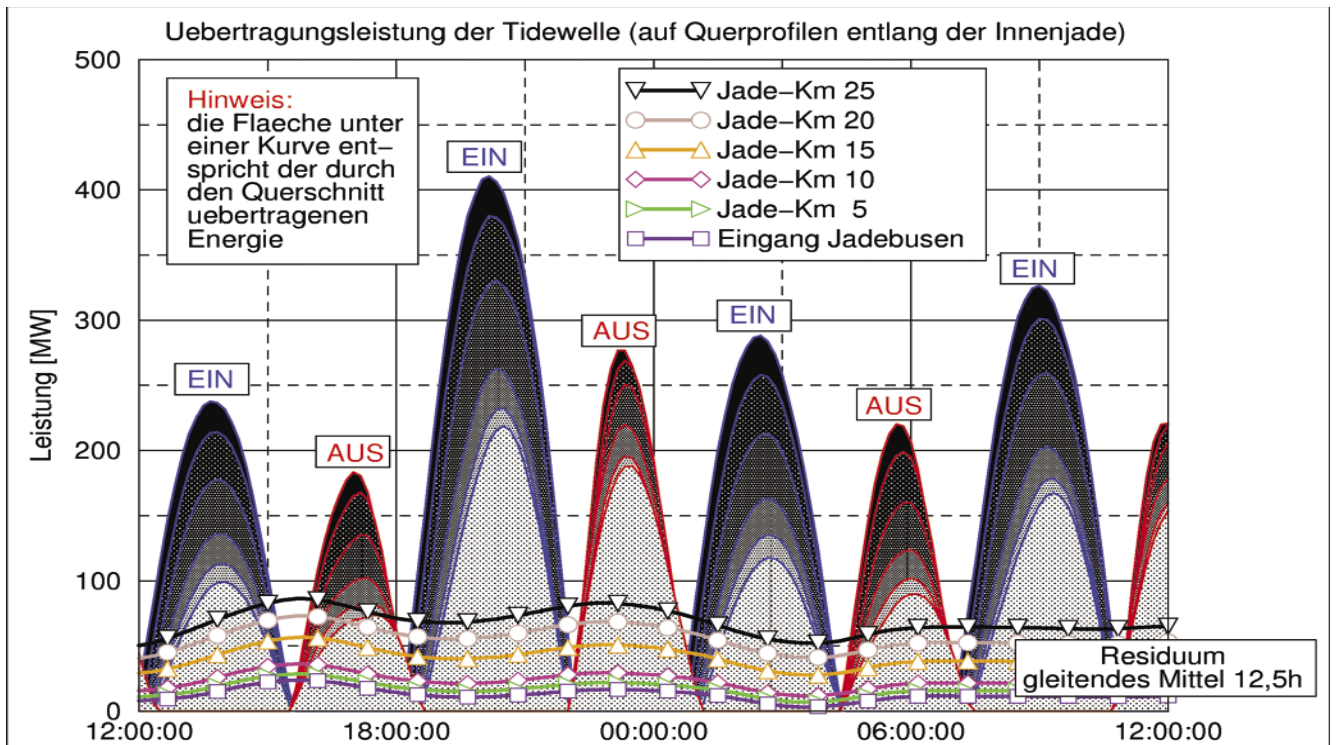


Bild 9: Aus den Ergebnissen eines HN-Modells abgeleitete aktuelle und mittlere Übertragungsleistung der Tidewelle für mehrere Querschnitte (siehe Bild 5) entlang der Innenjade. Bei Jade-km 25 erreicht die auslaufende Energie in etwa 50 % des Wertes der einlaufenden Energie. Dieser Anteil steigt bis zum Eingang des Jadebusens auf 75 % an. Die im Mittel (Residuum) in das System übertragene Leistung beträgt am Querschnitt Jade-km 25 ca. 70 MW und am Eingang zum Jadebusen noch ca. 15 MW. Daraus berechnet sich für den Bereich der Innenjade (200 km²) eine mittlere Energiedissipation von ca. 0,27 W/m² und für den Jadebusen (160 km²) 0,09 W/m². Dies zeigt, dass im Jadebusen verhältnismäßig wenig Energie dissipiert wird. Obwohl der Jadebusen einen Anteil von ca. 46 % an der Gesamtfläche aufweist, werden in ihm nur ca. 20 % der im Mittel am Querschnitt Schillig–Alte Mellum vorhandenen Übertragungsleistung dissipiert.

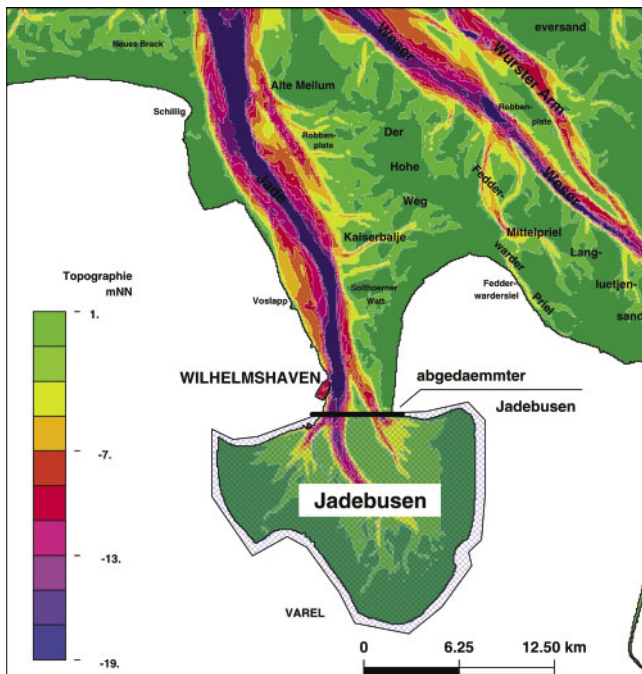


Bild 10: Szenario mit abgedämmtem Jadebusen. Dargestellt ist ein Teil des Modellgebietes für das Jade-Weser-System. Der Jadebusen wurde in diesem Fall durch eine senkrechte Wand von der Innenjade vollständig abgetrennt. Die Topographie in den anderen Bereichen entspricht hingegen den natürlichen Verhältnissen.

Jade ohne Jadebusen

Mit HN-Modellen können Szenarien untersucht werden, die einem Experiment in der Natur nicht zugänglich sind. So wurde z. B. durch Abtrennen des gesamten Jadebusens von der Innenjade (siehe Bild 10) der Einfluss desselben auf die Tiden der Jade untersucht.

In Bild 11 ist das Ergebnis dieses Szenarios für verschiedene Positionen entlang der Innenjade dargestellt (vergleiche nochmals mit Bild 2). Die Tidekurven werden fülliger und symmetrischer, Thw und Tnw treten früher als bisher ein und, trotz vollständiger Reflexion der Tidewelle an der künstlichen Abdämmung zum Jadebusen, sinkt der Tidehub im gesamten Verlauf der Innenjade, insbesondere aber im südlichen, vor Wilhelmshaven gelegenen Teil, stark ab.

Interpretation Mangel an Symmetrie

Zur Ursache des in Bild 2 dargestellten, von G. Hagen erstmals formulierten *Mangels an Symmetrie der Tidekurven*, bestätigt das vorgenannte, mit einem HN-Modell untersuchte Szenario die Vermutung Hagens: „Wahrscheinlich rührt dies von den ausgedehnten Wattgründen in dem Bassin der Jade her, die eine schnelle Ausgleichung des Wasserspiegels verhin-

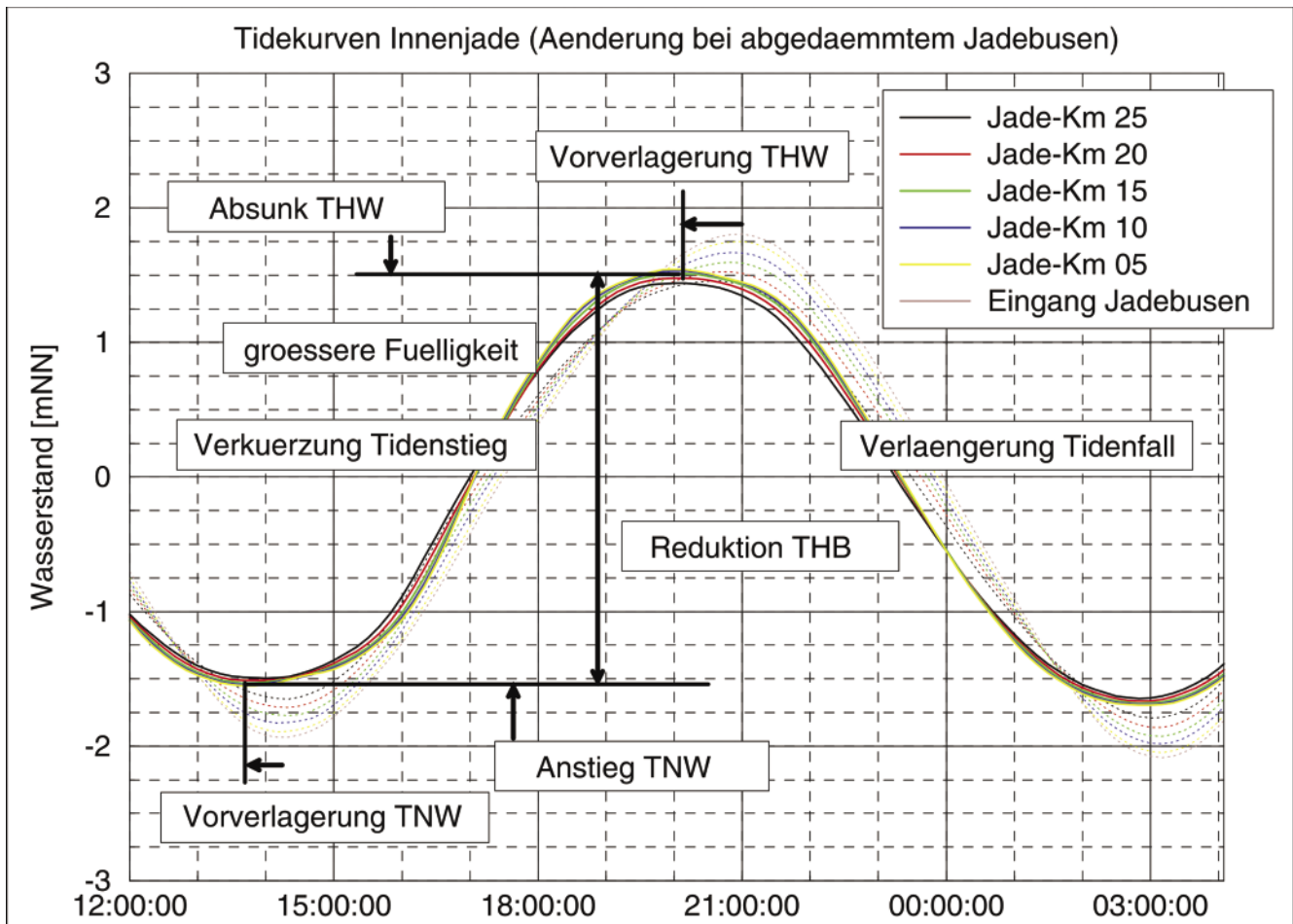


Bild 11: Einfluss einer Abdämmung des Jadebusens vom Einfluss der Gezeiten auf die Tidekurven in der Innenjade (siehe Bild 10). Mit einem HN-Modell des Jade-Weser-Systems berechnete Tidekurven für verschiedene Positionen entlang des Fahrwassers der Innenjade (Jade-km 25 bis Eingang Jadebusen). Gestrichelt dargestellt sind die Tidekurven für den Naturzustand mit Jadebusen (siehe nochmals Bild 2). Bei Abdämmung des Jadebusens nehmen Fülligkeit und Symmetrie der Tidekurven zu. Als Folge dessen gleichen sich Flutdauer und Ebbedauer an. Der von Hagen beobachtete „Mangel an Symmetrie“ verschwindet. Ferner sinkt das Thw während das Tnw steigt und der Thb somit kleiner wird. Die Eintrittszeiten des Thw wie auch die des Tnw erfolgen an allen dargestellten Positionen nahezu zeitgleich. Dies ist auf die vollständige Reflexion der Tidewelle an der künstlichen Abdämmung zum Jadebusen zurückzuführen.

dem.“ Ein Vergleich der in Bild 2 mit den in Bild 11 dargestellten Tidekurven beweist, dass diese Vermutung richtig war und auch heute richtig ist. Der Jadebusen trägt maßgeblich zu einem verlangsamten Anstieg des Wasserstandes am Ende der Flut bei und verzögert dadurch den Eintritt des Thw.

Tidehub

Die Entwicklung des Tidehubs bei Abdämmung des Jadebusens ist zunächst überraschend, da trotz vollständiger Reflexion der Tidewelle an der Abdämmung der Tidehub kleiner wird. Nun spielt bei Systemen wie der Jade allerdings noch ein weiteres Phänomen, nämlich das der *Resonanz*, eine Rolle. Die Jade besitzt, wie jedes schwingungsfähige System, die Fähigkeit, Energie zu speichern, die ihr von Außen durch die Gezeiten mit einer Periode von ca. 12:25 h zugeführt wird. Ein solches System kann um so mehr Energie aufnehmen, je näher die von außen aufgezwungene, an-

gende Frequenz in der Nähe einer Resonanzfrequenz des Systems liegt. Bei Buchten oder Ästuaren mit einem offenen und einem abgeschlossenen Ende ist die Resonanzbedingung dann (näherungsweise) erfüllt, wenn die Länge des Systems ein Viertel der Länge der Tidewelle beträgt. Für die in der Jade charakteristischen Wassertiefen beträgt diese kritische Länge ca. 135 km. Ab Wangerooge beläuft sich die aktuelle Länge der Jade allerdings nur auf etwa 40 % dieses Wertes, und ab Schillig sogar nur auf 27 %. Die Jade ist somit deutlich kürzer als dies für das Erfüllen der Resonanzbedingung der Fall sein müsste. Unter den für die Jade gültigen Randbedingungen geringer Energiedissipation ist dennoch eine resonanzbedingte Verstärkung der Tiden, die bei ca. 15 – 25 % liegen sollte, zu erwarten (siehe Bild 12). Dies erklärt, weshalb der Tidehub bei einer Abdämmung des Jadebusens im Vergleich mit dem natürlichen Zustand kleiner wird: Bei um ca. 15 km verkürzter Länge bewegt sich die Jade von der Resonanzbedingung fort (siehe nochmals Bild

12). Außerdem wird mit dem Jadebusen ein Gebiet geringer Dissipation aus dem System entfernt (siehe nochmals Bild 9). Dies führt zu einer höheren mittleren Energiedissipation in dem verbleibenden Restsystem. Kürzere Länge und größere (mittlere) Dämpfung führen aber zu einer Reduktion der Energiespeicherfähigkeit des Systems (siehe Bild 12).

Das Ergebnis des Szenarios unterstreicht damit noch einmal die herausragende Bedeutung des Jadebusens für den Tidecharakter in der Jade-Bucht: Erhöhen der verfügbaren Energie in der Innenjade durch größere Energiespeicherfähigkeit des Systems (geringe Dissipation im Jadebusen und Verlängern der Systemlänge zur Resonanzlänge hin). Der Erhalt dieses „funktionierenden“ Gesamtsystems Innenjade–Jadebusen bleibt daher von bekannt großer Bedeutung für die Offenhaltung des tiefen Jadefahrwassers.

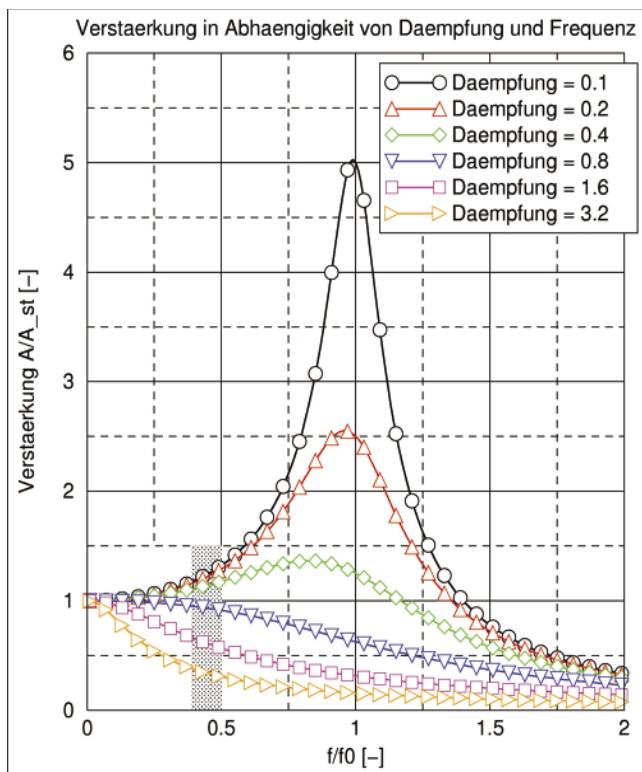


Bild 12: Verstärkung in einem linearen, schwingungsfähigen System in Abhängigkeit von Frequenz und Dämpfung (Dissipation). Das Verhalten für die Jade kann aus dem grau unterlegten Bereich abgeschätzt werden. Bei starker Dissipation müsste der Tidehub im Vergleich zu demjenigen in der Nordsee kleiner werden. Dies ist definitiv nicht der Fall. Bei geringer Dissipation ist hingegen eine Verstärkung um etwa 10–25 % zu erwarten. Wäre die Jade länger als sie es heute ist, so müsste der Tidehub resonanzbedingt rasch zunehmen. Eine Verkürzung bewirkt hingegen in jedem Fall eine resonanzbedingte Verkleinerung des Tidehubs.

Schlussbemerkungen

In diesem Beitrag wurden einerseits die Besonderheiten der Tidedynamik der Jade-Bucht näher beleuchtet und andererseits die spezielle Bedeutung des Jadebusens für das Systemverhalten unter verschiedenen Gesichtspunkten erörtert. Die Ergebnisse verschiedener Methoden (Beobachtungen in der Natur, theoretische Überlegungen, Ergebnisse von HN-Modellen und darauf aufbauende Analysen) führen zu einer konsistenten Sichtweise des Geschehens. Dies unterstreicht die gleichberechtigte und notwendige Ko-Existenz der verschiedenen Möglichkeiten, Erkenntnisse über in der Natur ablaufende Prozesse zu gewinnen.

Die Bedeutung des Jadebusens für die Offenhaltung des Jadefahrwassers wurde schon früh erkannt und trug maßgeblich zur Wahl Wilhelmshavens als Marinestützpunkt bei. Dies gilt auch heute noch, z. B. in Zusammenhang mit den aktuellen Planungen für den JadeWeserPort.

Hydraulische Wirkungsweise des JadeWeserPorts

DR.-ING. HOLGER SCHÜTTRUMPF, DR.-ING. ANDREAS KAHLFELD, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME I

1 Vorbemerkungen

Vor dem Hintergrund des anhaltenden stetigen Wachstums im internationalen Containerverkehr, des Wachstums der Schiffgrößen und damit einhergehend der veränderten Logistiksysteme ist an der Innenjade in Wilhelmshaven vor dem Voslapper Groden der Bau des Tiefwassercontainerterminals „JadeWeserPort“ geplant. Mit diesem Hafenneubau soll neben den etablierten Containerterminals in Hamburg und Bremerhaven ein neuer Standort erschlossen werden, der angesichts seiner geographischen Lage und seines konkurrenzlos tiefen Fahrwassers als Transshipment-Hafen vornehmlich für den Ostseeraum und das Baltikum konzipiert ist. Der JadeWeserPort soll zu den weltweit wenigen ausgewählten Anlaufhäfen für sehr große Containerschiffe auf den stark frequentierten Atlantik- und Fernostrouten zählen, von denen aus die weitere Verteilung der Container mit kleineren Feederschiffen erfolgt (*Hub and Spoke System*). Nach dem aktuellen Stand der Planungen kennzeichnet den Hafen insbesondere eine Stromkaje von 1.725 m nutzbarer Länge, eine Sollsohlentiefe von SKN -18 m in der Zufahrt und eine Hafenfläche von rd. 320 ha (Bild 1).

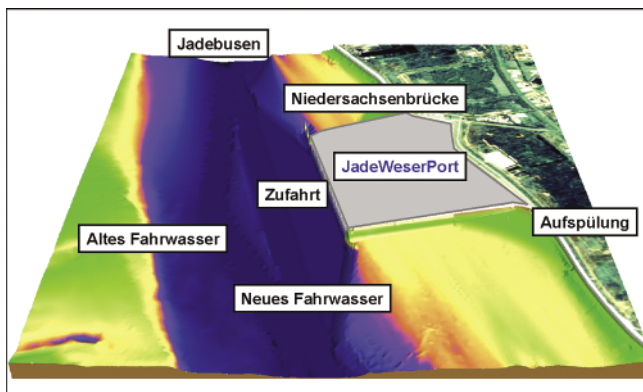


Bild 1: JadeWeserPort

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg (BAW DH), begleitet das Vorhaben eines Tiefwassercontainerterminals hinsichtlich der wasserbaulichen Fragestellungen bereits seit 1998 über die verschiedenen Planungsphasen hinweg und für verschiedene Auftraggeber. Schon im Rahmen der von der Wilhelmshaverer Hafenwirtschaftsvereinigung e.V. initiierten Machbarkeitsstudie „Jade-Port“ (Projektkonsortium „Jade-Port“ 2000) wurden die im Ergebnis positiven grundlegenden hydraulischen Untersuchungen zur technischen Realisierbarkeit durchgeführt. Auch in der unmittelbar nach der Veröffentlichung der Machbarkeitsstudie aufkommenden Standortdiskussion im Jahr 2000

trug die BAW mit Modelluntersuchungen zum Alternativstandort Cuxhaven und objektiven Aussagen zur Verschärfung der Thematik und zur Entscheidungsfindung bei.

Für die Vorbereitung des anstehenden Planfeststellungsverfahrens wurde die BAW im Jahr 2002 dann vom Träger des Vorhabens, der JadeWeserPort Entwicklungsgesellschaft mbH, mit der Fortsetzung der wasserbaulichen Untersuchungen hinsichtlich folgender Kriterien beauftragt.

- Vertiefung der Hafenzufahrt auf SKN -18 m
- Formänderung der Hafenfläche
- Veränderung der Kajenlage bei verschwenktem Fahrwasser

Um die Auswirkungen der modifizierten Planung auf die Tidedynamik der Jade und damit auf die zu erwartenden Auswirkungen auf

- das Ökosystem Jade-Weser-Ästuar,
- die Unterhaltungssituation des Jade-Fahrwassers sowie
- die Nachbarbetroffenheiten (Umschlagbrücken, Hafeneinfahrten, etc.)

zu minimieren, war eine Optimierung der Kajenlage in der Innenjade unter Berücksichtigung der zukünftigen Unterhaltungssituation im Zufahrtsbereich und im Fahrwasser sowie nautischer Randbedingungen erforderlich.

Im Folgenden soll die hydraulische Wirkungsweise des JadeWeserPorts dargestellt und anhand von Modellergebnissen belegt werden, um das Ergebnis der Optimierungsuntersuchungen darzustellen.

Die Tidedynamik der Innenjade und des Jadebusens für den heutigen Zustand (ohne den JadeWeserPort) wurde umfassend von LANG (2003) im gleichen BAW-Mitteilungsheft beschrieben.

2 JadeWeserPort-Modell

(a) Modellgitter

Das Modellgebiet (s. Bild 2) wurde für die Untersuchungen mit dem dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Modell UNTRIM-3D durch ca. 3 Mio. Elemente mit einer vertikalen Auflösung von 1 m (unterhalb von NN-30 m wurde eine vertikale Auflösung von

2 m gewählt) und einer horizontalen Auflösung zwischen ca. 10 m und 2.200 m nachgebildet. Fein aufgelöst wurde insbesondere die Innenjade, um die Prozesse im Nahbereich des JadeWeserPorts naturnah nachbilden zu können.

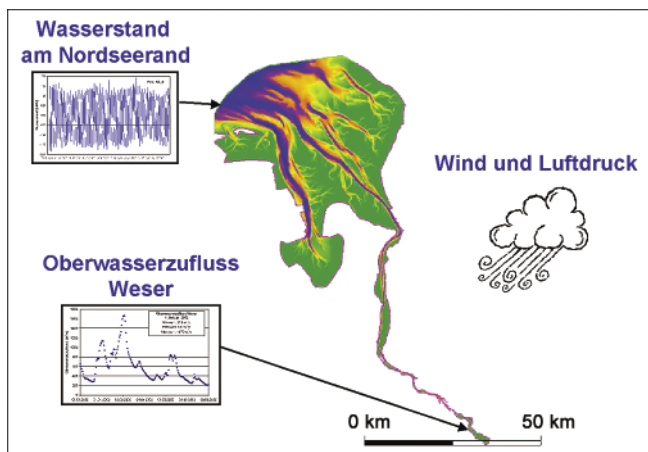


Bild 2: Modellgebiet und Randwerte

(b) JadeWeserPort

Form und Lage des JadeWeserPorts sowie die Gestaltung der Zufahrt und der verlegten Fahrrinne wurden im Modell berücksichtigt. Dazu wurden die folgenden Elemente für den **Ausbauzustand** nachgebildet:

- Kaje mit 1.725 m nutzbarer Länge
- Nördliche und südliche Bauwerksflanken mit Böschungen
- Nördliche Kajenspundwand und Unterwasserspundwand
- Zufahrtsbereich mit Sohltiefe von SKN -18 m
- Verschwenkung des Fahrwassers
- Nördliche und südliche Wattflächen im Anschlussbereich der Flanken an den Voslapper Seedeich

(c) Randwerte

Für die Steuerung des Modells wurden Randwerte verwendet, die hinsichtlich der Strömungen und Wasserstände einen charakteristischen Systemzustand der Jade repräsentieren und den Zeitraum eines Nipp-Spring-Zyklus abdecken. Als Simulationszeitraum wurde der 31. Mai 2002 bis 15. Juni 2002 gewählt. Es wurden die folgenden Daten für die Simulationen verwendet:

- Wasserstände am offenen, seeseitigen Modellrand, die während des Simulationszeitraumes auf dem Modellrand gemessen wurden,
- Tägliche Mittelwerte des Oberwasserzuflusses für den Simulationszeitraum am Pegel Intschede,
- Stündliche Winddaten aus dem Lokalen Modell (LM) des Deutschen Wetterdienstes (DWD), die vom Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) zur Verfügung gestellt wurden.

Weitere Zuflüsse zum Jade-Weser-Ästuar wurden nicht berücksichtigt, da sie keinen nennenswerten Beitrag zur Tidedynamik der Innenjade liefern und somit ohne Verlust der Prognosefähigkeit in der Modellierung vernachlässigt werden können.

3 Hydraulische Wirkungsweise des JadeWeserPorts

Für die Beurteilung der hydraulischen Wirkungsweise des JadeWeserPorts sind die physikalischen Prozesse von Bedeutung, die durch die einzelnen Elemente des JadeWeserPorts beeinflusst werden:

- Neues Fahrwasser und Zufahrtsbereich
- Bauwerksflanken
- Kajenlage

Die großräumigen ausbaubedingten Änderungen der abiotischen Systemparameter infolge des JadeWeserPorts ergeben sich aus der nichtlinearen komplexen Interaktion der verschiedenen hydraulischen Prozesse, die im **Ausbauzustand** durch das neue Fahrwasser, den Zufahrtsbereich, die Kajenlage und die Bauwerksflanken verursacht werden.

Im Folgenden soll jeweils die individuelle Wirkung der verschiedenen Hauptelemente des JadeWeserPorts auf die Tidedynamik dargestellt werden, bevor abschließend eine Aussage hinsichtlich ihrer Interaktion gemacht wird.

3.1 Neues Fahrwasser und Zufahrtsbereich

Zunächst soll nur die Wirkung des neuen Fahrwassers und des Zufahrtsbereichs auf die Tidedynamik der Jade betrachtet werden. Neues Fahrwasser und Zufahrtsbereich wirken aus hydraulischer Sicht wie eine lokale Vertiefung der Innenjade. Auf Grund der erhöhten Wassertiefen nehmen die Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten in unmittelbarer Nähe der Vertiefung ab. Außerdem reflektieren die Böschungen des Neuen Fahrwassers und des Zufahrtsbereichs die Tideenergie, wodurch es zu einer Abnahme des Tidehubs südlich des Zufahrtsbereichs kommt. Dieser Effekt wird überlagert vom Einfluss der Sohlreibung, der bei zunehmender Wassertiefe abnimmt. Mit abnehmender Sohlreibung bei zunehmender Wassertiefe kann mehr Tideenergie in den Jadebusen einschwingen und der Tidehub nimmt zu. Tendenziell wird der Einfluss der Energiedissipation infolge Vertiefung den Einfluss abnehmender Sohlreibung überlagern, sodass das neue Fahrwasser und der Zufahrtsbereich zu einer Verringerung des Tidehubs im Jadebusen führen.

3.2 Bauwerksflanken

Die nördlichen und südlichen Bauwerksflanken des JadeWeserPorts wirken aus hydraulischer Sicht wie eine partielle Abdämmung der Innenjade, wodurch die Flut- und Ebbeströmungen umgelenkt werden. Durch die Strömungsumlenkung an den Bauwerksflanken entstehen bei voll entwickelter Flut- bzw. Ebbeströmung Strömungswalzen, die bei Flutstrom rechtsdrehend und bei Ebbestrom linksdrehend sind. Die Strömungsumlenkung bewirkt weiterhin (Bild 3 und Bild 4):

- eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten im Strömungsschatten des JadeWeserPorts sowie
- eine Reduktion der Strömungsgeschwindigkeiten im Anströmbereich auf Grund der Stauwirkung des Bauwerks,
- eine Dissipation der Tideenergie.

Aus morphologischer Sicht führen die reduzierten Strömungsgeschwindigkeiten zu

- einer verstärkten Sedimentation und zu einer Anpassung der Küstenlinie an die Stromlinien sowie
- zu Anlandungserscheinungen im Zentrum der Strömungswalzen (Teetasseneffekt)

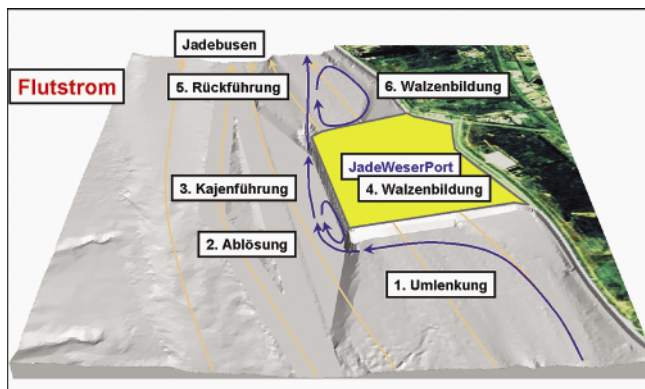


Bild 3: Umlenkung des Flutstroms durch den JadeWeser-Port

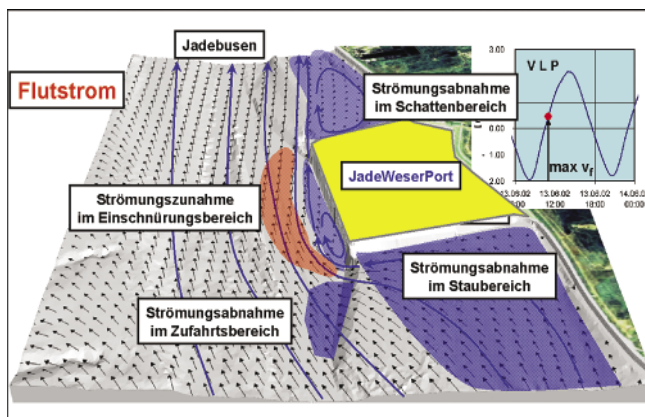


Bild 4: Auswirkungen der Strömungsumlenkung auf die Flutstromgeschwindigkeiten

Außerdem kommt es an den Kajenenden zu einer Strömungskonzentration, die u. U. zu Auskolkungen führen können.

3.3 Lage der Stromkaje

Die Lage der Kaje schnürt die Innenjade ein und wirkt somit aus hydraulischer Sicht wie eine lokale Verengung der Tiderinne, sodass die Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten vor der Kaje zwangsläufig zunehmen müssen. Ferner bewirkt eine Querschnittsverengung eine erhöhte Energiedissipation, die den Tidehub im Jadebusen abnehmen lässt. Überlagert wird dieser Effekt durch die Veränderung der Schwingungsverhältnisse in der Jade. Physikalisch wirkt der Jadebusen als Reflexionsstelle, an der die Tidewelle reflektiert wird. Dies lässt sich an der Zunahme des Tidehubs von der Nordsee zum Jadebusen hin erkennen. Der JadeWeserPort reflektiert bereits einen Teil der ankommenden Tideenergie, die restliche Tideenergie wird durch den Jadebusen reflektiert. Die vom Jadebusen reflektierte Tideenergie wird nun teilweise erneut durch den JadeWeserPort reflektiert bzw. fließt zurück in die Nordsee. Dadurch entsteht zwischen dem JadeWeserPort und dem Jadebusen ein zusätzliches Schwingungssystem. Insgesamt wirkt die Überlagerung der ausbaubedingten Änderung der Energiedissipation zusammen mit der Änderung des Schwingungsverhaltens.

3.4 Nichtlineare Interaktion der ausbaubedingten hydraulischen Prozesse

Die großräumigen ausbaubedingten Änderungen der abiotischen Systemparameter infolge des JadeWeserPorts ergeben sich aus der nichtlinearen Überlagerung der verschiedenen Einzeleffekte, die im **Ausbaustand** durch das neue Fahrwasser, den Zufahrtsbereich, die Kajenlage und die Bauwerksflanken verursacht werden. Auf Grund der Komplexität der Topographie des Jade-Weser-Ästuars sowie der nichtlinearen physikalischen Prozesse bei der Ausbreitung einer Tidewelle ist eine einfache lineare Überlagerung der jeweiligen hydraulischen Wirkungen der einzelnen Elemente des JadeWeserPorts nicht möglich, sondern kann nur auf der Grundlage eines hochauflösenden hydrodynamisch-numerischen Modells vorgenommen werden, das sowohl die komplexe Topographie als auch die nichtlinearen physikalischen Prozesse berücksichtigt. Dies gilt insbesondere, wenn die Auswirkungen einzelner Elemente, wie z. B. die Auswirkungen infolge Fahrwasserverlegung/Hafenzufahrt und Kajenlage, gegenläufig sind und somit die großräumigen ausbaubedingten Änderungen minimiert werden können. Auf Grund der Ausführungen in den Abschnitten 3.1 bis 3.3 ergibt sich,

- dass sich die ausbaubedingten Änderungen auf Grund der gegenläufigen physikalischen Wirkung von Vertiefung (Fahrwasser und Zufahrtsbereich)

und Verengung (Kajenvorbau) auf den Nahbereich des JadeWeserPorts konzentrieren,

- dass es auf Grund des veränderten Schwingungsverhaltens zu einer Zunahme des Tidehubs im Bereich der südlichen Bauwerksflanke und zu einer Abnahme des Tidehubs im Bereich der nördlichen Bauwerksflanke kommt,
- dass die Strömungsumlenkung an den Bauwerksflanken sowohl die Wasserstände als auch die Strömungsgeschwindigkeiten lokal beeinflusst,
- dass es im Strömungsschatten des Bauwerks bei vollentwickelter Flut- und Ebbeströmung zu Strömungswalzen kommt,
- dass sich die an den Bauwerksflanken umgelenkte Strömung an den Ecken der Kaje ablöst und somit vor der Kaje eine Zone geringer Strömungsgeschwindigkeiten entsteht.

4 Ausgewählte Modellergebnisse

Alle Modellergebnisse wurden auf der Grundlage einer vollständig dreidimensionalen hydrodynamisch-numerischen Simulation mit Untrim-3D ermittelt.

Auf Grund des Verbaus der Innenjade sowie der veränderten Schwingungsverhältnisse werden geringe Änderungen der Wasserstandsparameter in der Jade prognostiziert. Bild 5 zeigt, dass sich der Tidehub nur in den Bereichen Schillig-Mellum und südlich des JadeWeserPorts in der Größenordnung zwischen 0,5 cm und 1,0 cm ändert. Unmittelbar nördlich des JadeWeserPorts kommt es auf Grund des veränderten Schwingungsverhaltens zu einer Abnahme des Tidehubs. In den übrigen Bereichen liegen die ausbaubedingten

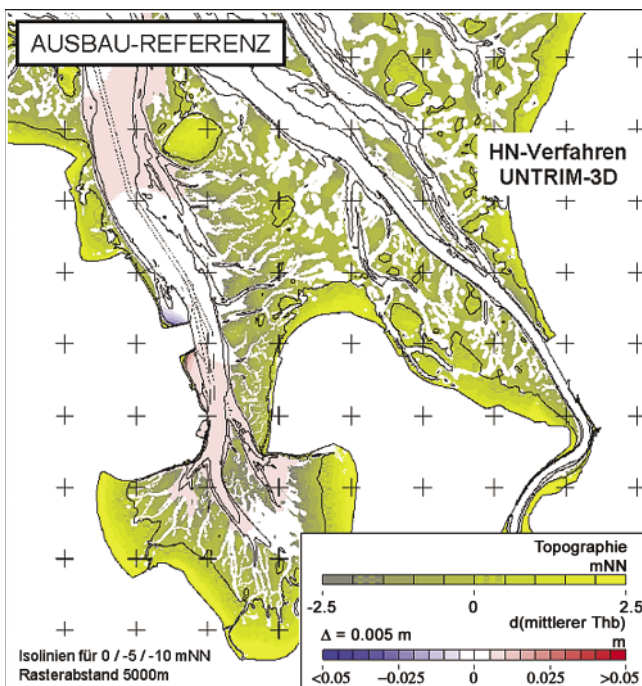


Bild 5: Ausbaubedingte Änderungen des mittleren Tidehubs

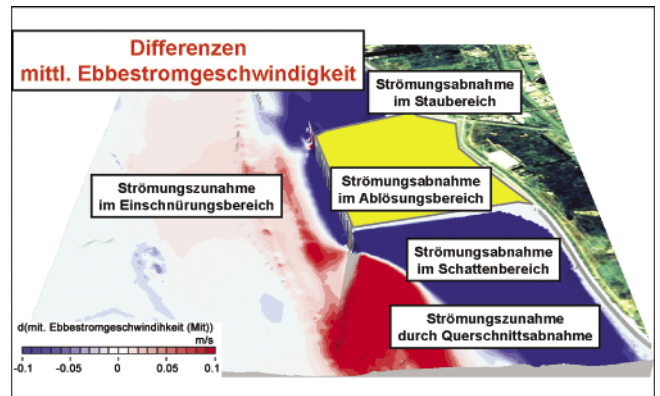


Bild 6: Ausbaubedingte Änderungen der mittleren Ebbestromgeschwindigkeiten

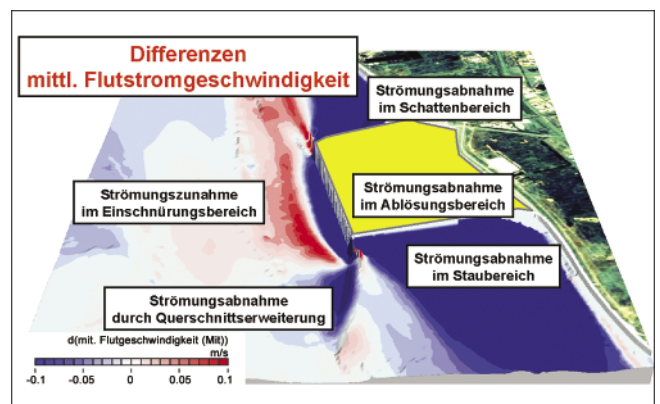


Bild 7: Ausbaubedingte Änderungen der mittleren Flutstromgeschwindigkeiten

Änderungen (Differenz Ausbauzustand - Referenzzustand) unterhalb des gewählten Schwellenwertes für die Darstellung von 0,5 cm.

Mit der Umlenkung der Flut- und Ebbeströmung kommt es zu Zu- und Abnahmen der Strömungsgeschwindigkeiten, die in Bild 6 und Bild 7 wiedergegeben werden. Änderungen der mittleren- Flut- und Ebbestromgeschwindigkeiten beschränken sich auf den Nahbereich des JadeWeserPorts, d. h. auf die südliche Innenjade. Nördlich und südlich des JadeWeserPorts treten auf Grund der Stau- bzw. Schattenwirkung des Hafengeländes Strömungsabnahmen auf, die mit lokalen Sedimentationserscheinungen verbunden sein werden. Im Zufahrtbereich vor der Kaje bewirkt die Strömungseinschnürung eine Zunahme der Strömungsgeschwindigkeiten bei Flut- und bei Ebbestrom. Unmittelbar entlang der Kaje ruft die Strömungsablösung Abnahmen in der Strömungsgeschwindigkeit hervor.

In den Übergangsbereichen von der vorhandenen Sohle zum eingeschnittenen Zufahrtsbereich kommt es bei Flutstrom zur Verringerung der Strömungsgeschwindigkeiten. Entsprechend bewirkt der Ebbestrom auf Grund der Wassertiefenabnahme vom Zufahrtsbereich in den ungestörten Bereich der Heppenser Rinne eine Erhöhung.

Ergebnisse zu weiteren Tideparametern sind auf der Internet-Homepage der Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, zu finden.

5 Schlussbemerkungen

Die Kajenlage des JadeWeserPorts wurde auf der Grundlage hydrodynamischer Simulationen optimiert, um die Auswirkungen des Bauwerks auf das Tide- und Ökosystem Jade und die Nachbarbetroffenheiten zu minimieren.

Die Ergebnisse der wasserbaulichen Systemanalyse zu den ausbaubedingten Änderungen der Tidedynamik infolge JadeWeserPort können wie folgt zusammengefasst werden:

- Keine signifikanten Änderungen der Tidekennwerte in Weser, Jadebusen und Außenweser
- Örtlich begrenzte Änderungen der Tidekennwerte in der Innenjade
- Anhebung der Fließgeschwindigkeiten im Zufahrtsbereich und im neuen Jadefahrwasser
- Günstige Voraussetzungen für das Freibleiben des Zufahrtsbereiches und des neuen Fahrwassers
- Sedimentationen im Stau- und Schattenbereich des JadeWeserPorts

Literatur

BAW (2002): JadeWeserPort – Voruntersuchungen zur hydraulischen Optimierung von Kajenlage, Fahrwasser und Zufahrtsbereich. Gutachten BAW-Internetseiten

(a) Dokumentation Untrim

<http://www.hamburg.baw.de/pkb/untrim/untrim-de.htm>

(b) Kolloquiumsvorträge vom 19.06.03 JadeWeserPort

<http://www.hamburg.baw.de/talk/PDF/v19062003-tidhs-de.pdf>

(c) Vorstellung des JadeWeserPort-Projektes

<http://www.hamburg.baw.de/talk/PDF/v19062003-bs-de.pdf>

<http://www.hamburg.baw.de/talk/PDF/v19062003-pr-de.pdf>

<http://www.hamburg.baw.de/talk/PDF/v19062003-hr-de.pdf>

CASULLI, V., WALTERS, R.A. (2000): An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations; International Journal for Numerical Methods in Fluids; Vol. 32, No. 3; S. 331-348

LANG, G. (2003) Ein Beitrag zur Tidedynamik der Innenjade und des Jadebusens (in diesem BAW-Mitteilungsblatt)

Projektkonsortium „Jade-Port“ IBP-ISL-PTC (2000): JadePort – Machbarkeitsstudie für einen Container- und Mehrzweckhafen in Wilhelmshaven. Erstellt für: Hafendienst Wilhelmshaven GmbH

SNIPPE, B. (2003) JadeWeserPort: HANSA, 140. Jahrgang, Heft 5

Hydrodynamik des Weserästuars

DR.-ING. REINER SCHUBERT, DIPL.-ING. HOLGER RAHLF, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME I

Unter- und Außenweser

Als Unterweser wird der Bereich der Weser zwischen Bremen (km -4, Weserwehr) und Bremerhaven (km 65) bezeichnet. Sie ist tidebeeinflusst und als Seeschiffahrtsstraße ausgebaut. Schutzdeiche und Sturmflutsperrwerke begleiten die Weser in diesem Abschnitt. Ab Bremerhaven erhält die Weser die Bezeichnung Außenweser (km 65 bis 126). Wattwasserscheiden stellen in der Außenweser die seitlichen Begrenzungen dar und grenzen sie zur Jade und zum allgemeinen Wattenmeer ab. Zwei Leitwerke auf Langlütjensand und Robbenplate sowie zahlreiche Buhnen legen in diesem Bereich den Verlauf der Fahrrinne fest. Bevor zu Anfang des 20. Jahrhunderts diese Festlegung durchgeführt wurde, gab es signifikante morphologische Änderungen der Rinnen der Außenweser, die die Schifffahrt mehr oder minder behinderten. Bild 1 zeigt die Topographie (Stand: 2000) der Unter- und Außenweser.

Der 9 m–Ausbau der Unterweser (1973 - 1979) sowie der SKN–14 m Ausbau der Außenweser (1998 - 1999) stellen die beiden letzten größeren Eingriffe in die Unter- bzw. Außenweser dar, mit denen das Ästuar an die heutigen Erfordernisse einer modernen Wasserstraße angepasst wurde. Dabei waren und sind neben den beiden bedeutenden Seehäfen Bremen und Bremerhaven auch die Seehäfen Nordenham (1998: 2,0 Mio. t) und Brake (1998: 4,8 Mio. t) zu berücksichtigen. In den bremischen Häfen wurden 2002 erstmals über 3 Mio. TEU abgewickelt. Bemerkenswert sind dabei die hohen Zuwachsraten, z. B. im 5-Jahresvergleich von +77,8 %, was für den Zeitraum 1997 bis 2002 einer durchschnittlichen Zuwachsrate von 12,2 % entspricht. Der Anteil der Container am gesamten Stückgutumschlag beträgt nunmehr 84,4 %. Der im Jahre 1991 fertiggestellte Containerterminal CT III wurde verlängert (CT III a). Die Übergabe erfolgte im November 2003. Eine weitere Verlängerung der Kaje (CT IV) ist in Planung.

Die Entwicklung der Containerschifffahrt und zahlreiche Studien zeigen, dass der Gütertransport durch größere Schiffseinheiten wirtschaftlicher ist. Die Reedereien haben entsprechende Schiffseinheiten in der Planung bzw. schon im Bau. Um die Wettbewerbsfähigkeit der Seehäfen an der Weser weiterhin zu gewährleisten, besteht der dringende Wunsch der Hafenwirtschaft und der Länder für eine weitere Anpassung der Unter- und Außenweser. Daher wird in der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung über weitere Ausbau-

maßnahmen nachgedacht. Die Politik, die Verbände aber auch die Öffentlichkeit fordert eine „ganzheitliche Betrachtung“ von Unter- und Außenweser. Dabei sind auch die Änderungen der Hafenstrukturen und die damit verbundenen Baumaßnahmen (z. B. Verfüllung des Überseehafens in Bremen) und folgende Besonderheiten der Weser sind zu betrachten:

- Die Fahrrinne der Außenweser ist im Bereich von km 79 bis 90 durch Leitwerke festgelegt. Es ist zu untersuchen, ob deren geometrischen Abmessungen (Höhe und Länge) den heutigen und auch zukünftigen Erfordernissen entspricht.
- Die Buhnenfelder der Unterweser sind bis km 48,5 fast vollständig aufgeschlickt. Auch aus diesem Grund ergibt sich ein Trend zur Eintiefung in der Unterweser, die mit der Ausbildung großer Sohlformen (Transportkörper) verbunden ist. Die morphologische Reaktion des Systems auf eine weitere Vertiefung muss daher detailliert untersucht werden.

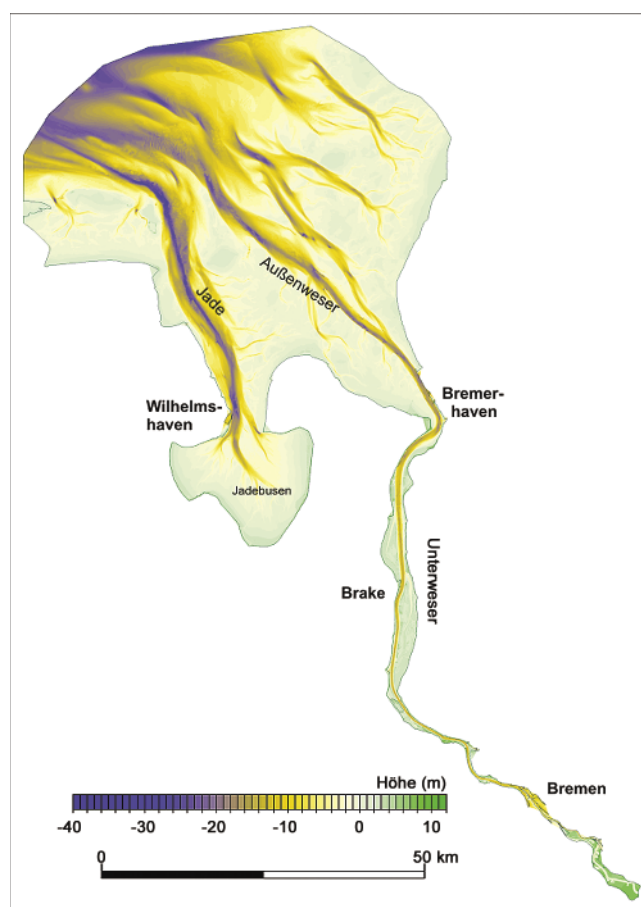


Bild 1: Topographie der Außen- und Unterweser

Die Forderungen der heutigen Umweltgesetzgebung in Kombination mit dem Klagerecht der Umweltverbände nach dem Bundeswasserstraßengesetz (BWStrG) und zunehmend auch wirtschaftliche Aspekte (Unterhaltung der Seeschiffahrtsstraße) erfordern neben einer detaillierten Planung des Ausbaus auch eine vertiefte fachwissenschaftliche Untersuchung der hydrodynamischen und morphologischen Änderungen. Problembereiche sind hierbei der möglicherweise verstärkte Stromauftransport von (Fein-)Sedimenten und die Ausbildung und Dynamik der Transportkörper. Im Bereich der Brackwasserzone eines Ästuars kann dieses nur auf Basis eines dreidimensionalen, hydrodynamisch-numerischen Modells untersucht und bewertet werden.

Die Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, betreibt ein derartiges Modell, welches ständig weiterentwickelt und an die gestiegenen Anforderungen der Auftraggeber angepasst wird. Eingesetzt wird derzeit das Programmsystem UNTRIM/Sedimorph. Das Programm UNTRIM berechnet auf einem unstrukturierten Gitter die hydrodynamischen Grundgleichungen, aus denen sich in jeder Gitterzelle der Wasserstand und über die Tiefe verteilte Strömungsgeschwindigkeiten ergeben. Mit Hilfe der Transportgleichung wird gleichzeitig der Transport und damit die zeitlich variable Verteilung gelöster und suspendierter Stoffe berechnet. Alle notwendigen Daten werden an das Programm Sedimorph übergeben, welches

- auf Basis der lokalen Verteilung der Sedimente und Sohlformen die Bodenreibung,
- auf Basis der abgeleiteten Bodenschubspannungen die Erosion und Sedimentation von Sedimenten an der Gewässersohle,
- auf Basis der sohlnahen Strömungsgeschwindigkeiten den Transport der Sedimente an der Sohle
- und daraus insgesamt die Bodenevolution, d. h. die zeitliche morphologische Entwicklung des Bodens,

berechnet.

Zum Betrieb des Modells sind für das gesamte Modellgebiet Eingangsdaten (Topographie, Sedimentverteilung u. a.), für die Modellränder Steuerdaten (Wasserstände, Zuflüsse, Windfelder u. a.) und im Modellgebiet Kalibrierungsdaten (Wasserstände, Strömungen, Konzentrationen u. a.) notwendig.

Neben der Erfassung der standardisierten gewässerkundlichen Größen, Pegelkurven und Oberwasserabflüsse, wurde ein Sondermessprogramm konzipiert und durchgeführt. Dieses beinhaltete zur Steuerung des Modells Sondermessungen auf dem seeseitigen Rand sowie ADCP-Strömungsmessungen zur Kalibrierung des Modells. Mit ihnen wurden an ausgewählten Positionen vertikale Strömungsprofile (Workhorse-Messungen) und über ausgewählte Querschnitte

te die Strömungsverteilung (schiffsgestützte Messungen) erfasst. In Bild 2 sind die Positionen der stationären Geräte mit Wh1 bis Wh4 bezeichnet. Die vertikalen Geschwindigkeitsprofile wurden vom 31. Mai 2002 bis zum 12. Juni 2002 als 1-minütige Mittelwerte abgelegt.

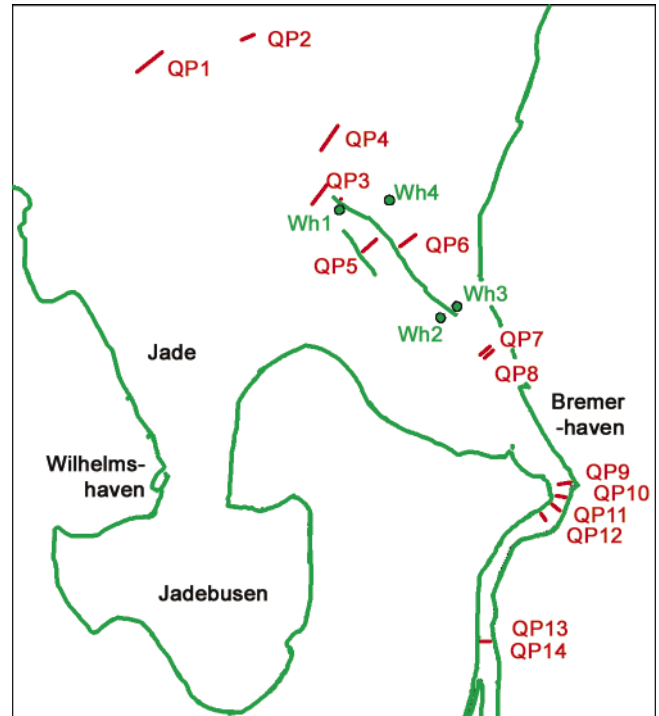


Bild 2: ADCP – Messungen 2002

Die Positionen der Querprofilmessungen sind mit QP1 bis QP14 bezeichnet (Bild 2). Diese Messungen wurden mit zwei Schiffen vom 6. Juni 2002 bis 19. Juni 2002 durchgeführt, wobei jeweils zwei Querschnitte (QP1 + QP2, QP3 + QP4 usw.) für den gleichen Zeitraum und für eine volle Tide erfasst wurden.

Modellierung

Für das Jade–Weser–Ästuar wurde ein dreidimensionales, hydrodynamisch–numerisches Modell auf Basis eines unstrukturierten Gitters aufgebaut. Die laterale Auflösung orientiert sich an den modelltechnischen und topographischen Gegebenheiten, die vertikale Auflösung wurde zu 1 m gewählt. Die aktuellen Peildaten wurden soweit berücksichtigt, wie sie zurzeit der Modellerstellung vorlagen.

Eine erste, vorläufige Kalibrierung erfolgte durch den Vergleich der berechneten und gemessenen Wasserstände an den Pegelpositionen des Ästuars. Anhand des Vergleichs zwischen gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten soll die Kalibrierung weiter verbessert werden. Auf Basis dieser ersten Ergebnisse werden im Folgenden die komplexen Strömungsverhältnisse in der Außenweser dargestellt.

Bild 3 oben zeigt einen Ausschnitt von zwei Tiden der an Position WH2 gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten in einer Zeit–Tiefen–Darstellung. Die vertikale Auflösung beträgt 0,5 m, die horizontale (zeitliche) Auflösung 10 Minuten. Die gleiche Darstellung für die Modellergebnisse zeigt Bild 3 in der Mitte, wobei allerdings die vertikale Auflösung 1 m und die zeitliche 20 Minuten beträgt. Als erstes ist zu erkennen, dass die Modellergebnisse zurzeit noch einen „glatteren“ Verlauf haben. Zu bemerken ist aber, dass das prinzipielle Systemverhalten vom Modell gut wiedergegeben wird.

Auffällig ist die Flutstromdominanz an dieser Position. Die Flutströmungen sind sowohl in den Messungen als auch in den Modellergebnissen höher und ausgeprägter. Deutlich ist der zeitliche Unterschied der Kenterung der Ebbeströmung zwischen Sohle und Wasseroberfläche. Die Zeiträume mit geringen Geschwindigkeiten sind in Sohlnähe wesentlich länger als an der Gewässeroberfläche. In den Messungen sind speziell bei einsetzender Flutströmung signifikante Einflüsse barokliner Kräfte zu erkennen. Der Transport von gelöstem Salz führt infolge der Verteilung des Salzgehalts und der Strömungsgeschwindigkeiten über die Wassersäule zu instabilen Schichtungen, die durch Durchmischungsprozesse abgebaut werden. Von einer instabilen Schichtung wird dann gesprochen, wenn schwereres Wasser (z. B. infolge einer höheren Substanzkonzentration) sich über leichterem Wasser befindet. Es findet bereichsweise eine turbulente Durchmischung über die Wassersäule statt, wodurch auch Geschwindigkeitsgradienten abgebaut werden. Dies ist in Bild 3 zu erkennen. Die Tagesungleichheit der Tiden ist in den Strömungen abzulesen. Ein höherer Tidenhub bewirkt eine Zunahme der Strömungen und damit der Transportwege. Das Bild 3 unten zeigt in der Zeit–Tiefen–Darstellung den berechneten Salzgehalt an der gleichen Position. Spezielle Messungen, die eine derartige Darstellung erlauben, liegen nicht vor. Die höher auflaufende Flut am Abend (06.06.2002, 22:00 Uhr) zeigt höhere Salzgehalte als die am Vormittag (09:30 Uhr) des gleichen Tages.

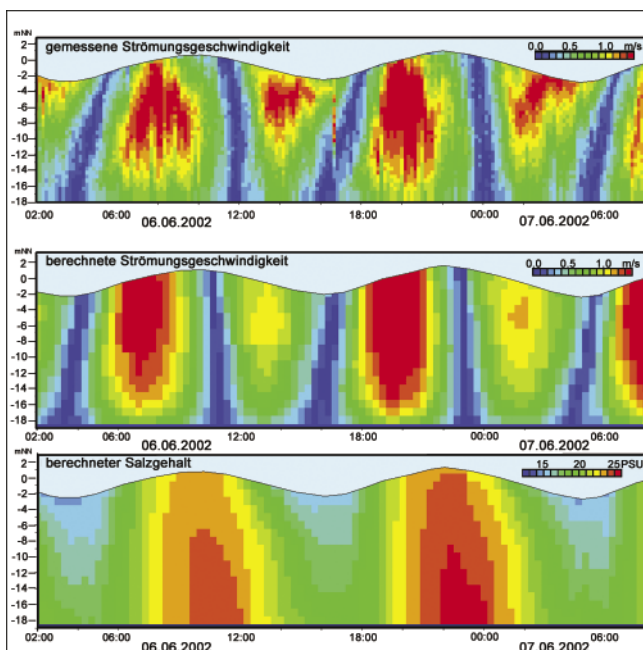


Bild 3: Bei Weser-km 79,5 (querab Robbensüdsteert) gemessene (oben) bzw. berechnete (Mitte) Strömungsprofile und berechnete Salzgehaltsprofile (unten)

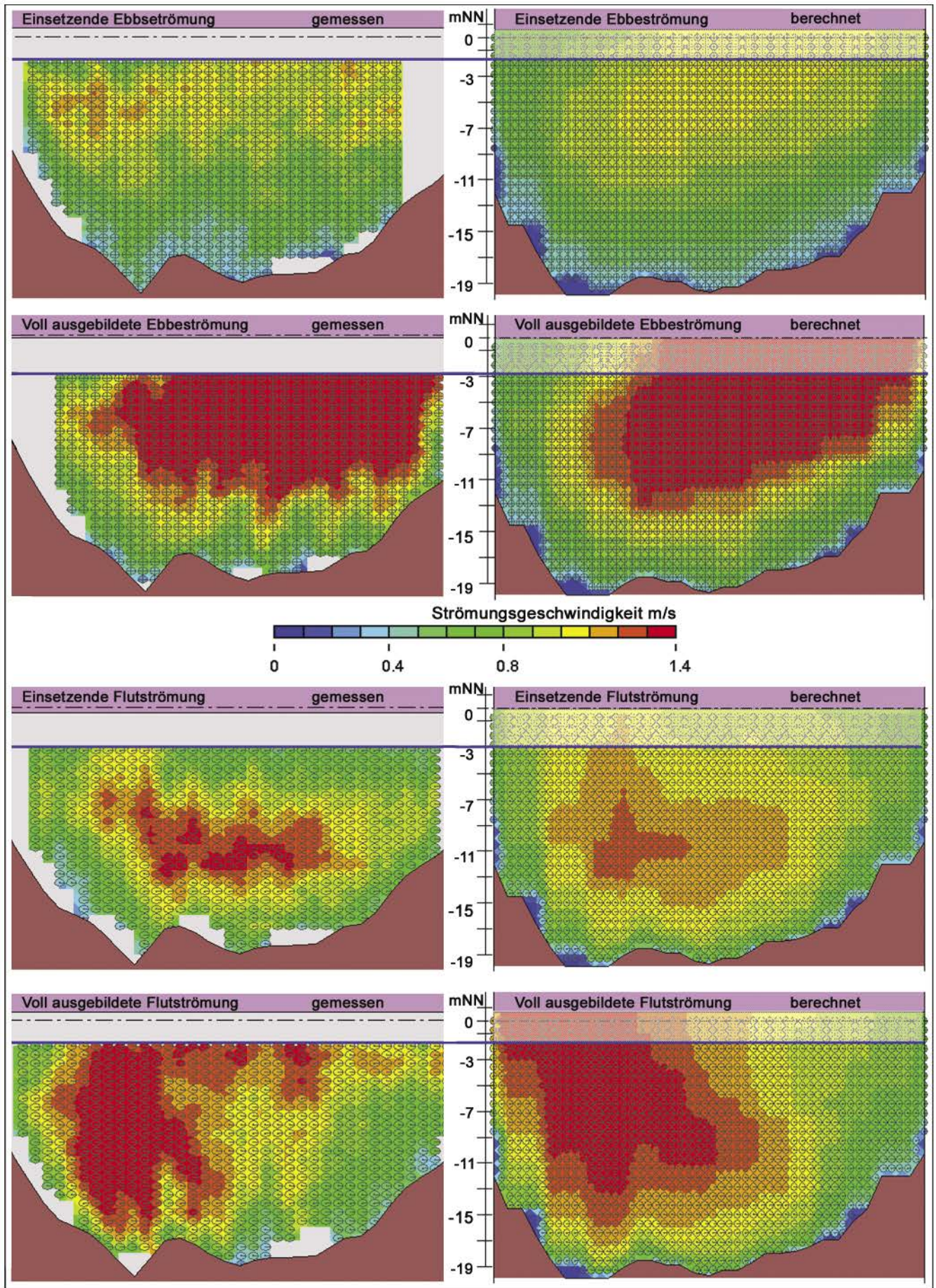


Bild 4: Stromab Bremerhaven (QP8) gemessen (links) und berechnete (rechts) Strömungsprofile für ausgewählte Zeitpunkte der Ebbe- (oben) bzw. Flutphase (unten)

Bild 4 zeigt eine Gegenüberstellung stromab von Bremerhaven gemessener und berechneter Flut- bzw. Ebbeströmungen (Querschnitt QP8, siehe Bild 2). Beispielhaft sind folgende vier Zeitpunkte dargestellt: einsetzende und voll ausgeprägte Ebbeströmung, einsetzende und voll ausgeprägte Flutströmung. Sowohl die Messungen als auch die Berechnungen zeigen, dass

- die Ebbeströmung ihr Schwergewicht am östlichen (rechten) und die Flutströmung am westlichen (linken) Ufer hat.
- die Ebbeströmung sich von der Oberfläche aus entwickelt, während sich die Flutströmung im Bereich der halben Wassertiefe entwickelt.

Wenn auch die Messungen deutlich turbulenter Strömungen zeigen als die zurzeit vorliegenden Berechnungsergebnisse, so ist doch schon von einer guten Übereinstimmung zu sprechen. Eine Optimierung der Modellparameter (örtliche Diskretisierung, Kalibrierungsparameter usw.) dürfte eine weitere Verbesserung im Vergleich Messung / Rechnung bringen.

Ausblick

Es wurden erste Ergebnisse des im Aufbau befindlichen 3D–HN–Modells des Jade–Weser–Ästuars gezeigt. Basis des Modells ist das Programmsystem UNTRIM/Sedimorph. Die Berechnungsergebnisse wurden Messdaten gegenübergestellt, die bei einer speziellen Messaktion im Untersuchungsgebiet gewonnen wurden. Ein detaillierter Vergleich mit den Messungen speziell in den Problembereichen zwischen den Leitwerken und im Blexer Bogen steht noch aus. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen aber, dass die spezifischen Charakteristika der komplexen, durch barokline Effekte beeinflussten Strömungen durch das Modell wiedergegeben werden. Nach der endgültigen Verifikation des Modells steht in absehbarer Zeit ein Werkzeug zur Verfügung, mit dem die aktuellen, aber auch zukünftige Aufgaben der Optimierung und Anpassung bearbeitet werden können. Es ist insbesondere davon auszugehen, dass infolge der guten Approximation der Strömungen auch eine den fachlichen Anforderungen entsprechende Modellierung des Sedimenttransportes durchgeführt werden kann und damit

- die ausbaubedingten Wirkungen geplanter Maßnahmen untersucht,
- die geplanten Maßnahmen hinsichtlich der ausbaubedingten Wirkungen und der zukünftigen Unterhaltung optimiert,
- aber auch Strombaukonzepte zur Minimierung der aktuellen Unterhaltungsaufwendungen untersucht

werden können.

Es zeigt sich, dass die Entwicklung und der Betrieb eines derartigen Modells auf umfangreiche, hochwertige Naturmessungen angewiesen ist. Nur die Kombination von Naturmessungen und Modellberechnungen kann zu einem vertieften Systemverständnis führen.

Tidedynamik der Elbe

DIPL.-OZEANOGR. MARCUS J. BOEHLICH, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME II

Viele Flüsse unseres Planeten sind von Gezeiten beeinflusst. Die durch die Gezeitenkräfte hervorgerufene Tidewelle wandert von der Mündung des Flusses hinauf bis zur Tidegrenze, wobei ihre Fortschrittsgeschwindigkeit von der Wassertiefe abhängt. Im Gegensatz zum tiefen Ozean ist die Wassertiefe im Tidefluss beinahe in der Größenordnung der Tidewellenamplitude, was dazu führt, dass bei Niedrigwasser der Fluss in einem signifikant anderen Bett verläuft, als bei Hochwasser. Als Ergebnis dieser Verhältnisse schreitet der Berg der Tidewelle (Hochwasser) schneller fort als das Wellental (Niedrigwasser), was zu einer Verformung der Tidekurve mit einer relativ langen Zeit zwischen Hochwasser und dem nachfolgenden Niedrigwasser (Tidefall) und einer entsprechend kürzeren Zeit zwischen Niedrigwasser und dem nächsten Hochwasser (Tidestieg) führt.

Im Ozean treten die maximalen durch die Gezeiten erzeugten Strömungen jeweils bei Hoch- und Niedrigwasser auf. Je weiter man den Fluss hinaufgeht, desto mehr verschieben sich diese Strömungsmaxima, bis im Falle von Totalreflexion der Tidewelle an einem Wehr das Stauwasser bei Hoch- und Niedrigwasser eintritt.

Dabei wird die Ebbestromdauer einerseits durch die Asymmetrie der Tidekurve und andererseits durch den mehr oder weniger starken Oberwasserzufluss in das Ästuar gegenüber der Flutstromdauer verlängert.

Wie nun die Ausprägung und Entwicklung der Gezeiten in dem jeweiligen Tidefluss ist, hängt von der Topographie, der anregenden Gezeit, dem Oberwasserzufluss und anderen äußeren Kräften, wie z. B. der horizontalen und vertikalen Verteilung der Salinität und dem jeweils herrschenden Wind, ab.

Unter einigen der genannten Aspekte soll die Tideelbe in diesem Beitrag betrachtet werden.

Die obere Grenze des Tideästuars Elbe wird, solange keine Sturmflutwasserstände herrschen, durch das Wehr Geesthacht gebildet. Hier gelangen die weiter oberhalb bei Neu Darchau gemessenen Wassermengen mit einem Zeitverzug von 1 – 2 Tagen als Oberwasserzufluss in die Tideelbe (Tabelle 1).

Die Elbe ist vom Wehr bis zum ca. 20 km entfernten Bunthaus typischerweise 300 – 500 m breit. Dieser Bereich heißt „obere Tideelbe“, wird von der Bevölkerung aber nur lax „Oberelbe“ genannt. Bei Bunthaus, wo die Unterelbe beginnt, teilt sich der Fluss in Norder- und Süderelbe auf, wobei jeder Arm anfangs nur noch ca. 200 m breit ist. Die Breiten nehmen jedoch nahezu

kontinuierlich zu, sodass beim Aufeinandertreffen der beiden Arme die Norderelbe ca. 400 m und die Süderelbe ca. 300 m breit sind und die nun wieder vereinigte Elbe eine Breite von ca. 500 m hat. Weitere 7 km unterhalb verbreitert sich der Fluss mit der Elbbucht Mühlenberger Loch abrupt auf 2,5 km. Von hier verläuft die Fahrrinne der Elbe in einem ständig Form und Breite ändernden Bett, wobei die Inseln Hans-Kalb-Sand/Schweinsand/Neßsand, Lühesand, Drommel/Auberg/Bishorster Sand, Pagensand, Schwarztonnensand und Rhinplatte Nebenelben entstehen lassen. Bei Niedrigwasser treten als sichtbare formende Elemente einige Sände wie Brammer Bank, Böschrücken und der Medem-Sand hinzu.

Niedrigster beobachteter Zufluss	145 m ³ /s
Mittlerer niedrigster Zufluss	278 m ³ /s
Mittlerer Zufluss	711 m ³ /s
Mittlerer höchster Zufluss	1870 m ³ /s
Höchster beobachteter Zufluss	3620 m ³ /s

Tabelle 1: Oberwasserzufluss Neu Darchau 1926/1999 (Quelle: Deutsches Gewässerkundliches Jahrbuch Elbegebiet, Teil III, 1999)

Unterhalb Brunsbüttel weitet sich die Elbe zum Mündungstrichter, der eine maximale Breite von ca. 17,5 km (Cuxhaven – Trischendammschlag) erreicht. Bei Niedrigwasser bleiben davon gerade mal noch ca. 1,5 km übrig, da der größte Teil des Mündungstrichters der Elbe trocken fällt. Dass diese vom Wasserstand abhängige Form des Flussbettes nicht ohne Folgen auf das Tidegeschehen sein kann und daher andere Phänomene entstehen, als in Tideflüssen mit weniger großen Änderungen des Querschnittes, ist angesichts der oben erwähnten Zusammenhänge offenkundig.

Von Cuxhaven seewärts beginnt die Außenelbe (Bild 1), deren Nordsee-seitige Grenze etwa bei den Großbaken A und Z nördlich des Scharhörnriffs liegt.

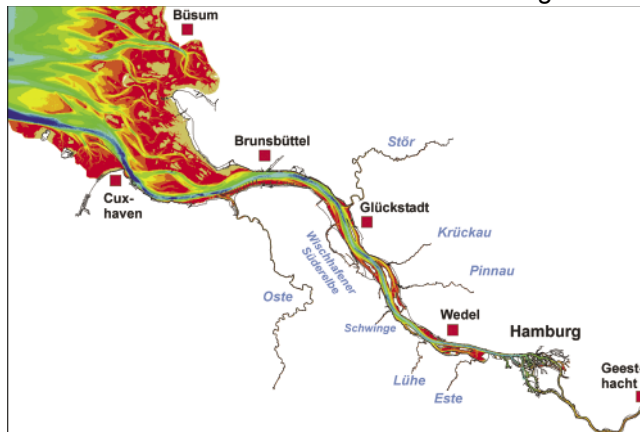


Bild 1: Übersicht der Unter- und Außenelbe

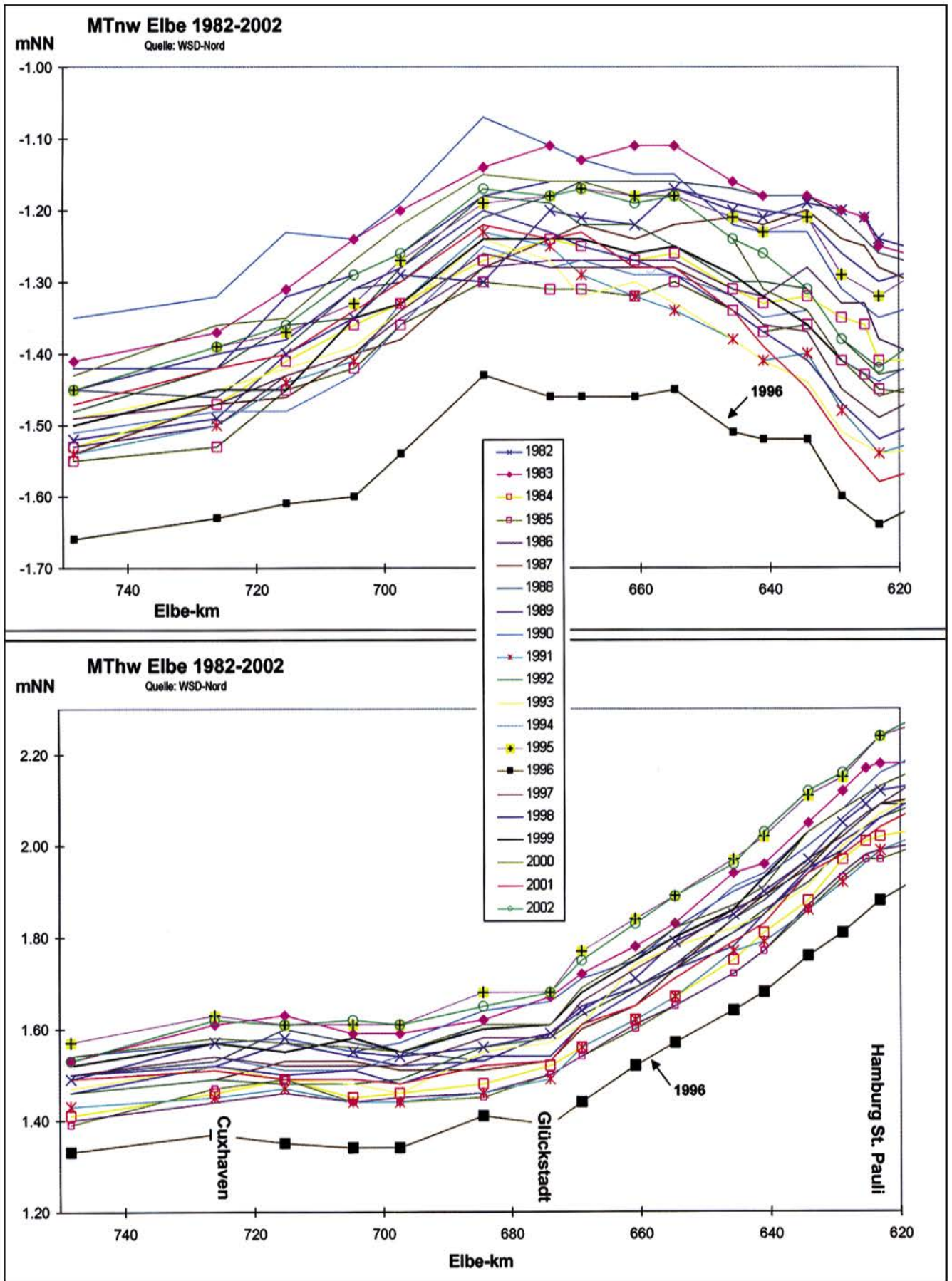


Bild 2: Längsprofile der Jahresmittelwerte des mittleren Tidehoch- und -niedrigwassers entlang der Elbe

In die Tideelbe münden folgende Nebenflüsse: Ilmenau, Este, Wedeler Au, Lühe, Schwinge, Pinnau, Krückau, Stör und Oste deren Vorhandensein für die Tidedynamik der Elbe von untergeordneter Bedeutung ist.

Wasserstände

Das Bild 2 zeigt den Bereich, den die über ein Jahr gemittelten Tidehoch- (MThw) und -niedrigwasserstände (MTnw) zwischen Hamburg und der Außenelbe eingenommen haben. Auffällig ist hier das Jahr 1996, in dem sowohl das MThw als auch das MTnw deutlich niedriger liegt als die Kurven der anderen Jahre. Dies liegt an einem überproportional großen Anteil an Ost- und Südostwind, der in Bild 3 dokumentiert ist. Wind aus diesem Sektor wirkt erniedrigend auf den mittleren Wasserstand und dämpfend auf das Tidegeschehen. Trotzdem zeigt auch dieses Jahr die gleichen Strukturen wie die anderen Jahre: Von See kommend, steigt das MTnw bis Glückstadt um ca. 25 cm an, um dann in Richtung Hamburg wieder abzusinken. Dabei ist die Differenz zwischen dem MTnw in Cuxhaven und dem in Hamburg im Laufe der letzten 30 Jahre ständig kleiner geworden und beträgt heute fast 0 m. Das MThw zeigt entlang des Flusses eine andere Entwicklung: Von See kommend bis ca. Glückstadt steigt das MThw nur gering an und steigt von dort bis Hamburg um ca. 0,5 m an. Dieser Anstieg ist in den letzten 30 Jahren um ca. 0,25 m größer geworden. Diese Entwicklung ist eine Folge der Veränderung des Flussbettes der Elbe auf die später noch eingegangen wird.

Das Bild 4 zeigt Tidewellenlinien bei Spring- und Nippzeit. Sie geben Auskunft über die in der Elbe anzutreffenden Gradienten und die Steig- und Fallgeschwindigkeiten des Wasserstandes (bei Normaltiden) und zeigen deutlich, dass es sich bei der Tide um eine Wellenbewegung handelt. Liegen die Tidewellenlinien eng beieinander, so sind die Steig- bzw. Fallgeschwindigkeiten klein, liegen sie weiter auseinander, so sind diese Geschwindigkeiten groß. Allein aus dem Gradienten des Wasserstandes lässt sich, anders als im Binnenbereich, noch nichts über die resultierenden Strömungsgeschwindigkeiten aussagen. Obwohl die Gradienten sowohl bei Flut als auch bei Ebbe von See bis Hamburg nahezu gleich groß sind, werden die maximalen Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser von Hamburg Richtung See fast kontinuierlich größer, wobei hier die Ebbestromgeschwindigkeiten stärker ansteigen als die Flutstromgeschwindigkeiten.

Deutlich ist auch die durch den abrupten Wandel der Breite und Tiefe der Topographie bei Bunthaus und das Wehr in Geesthacht ausgelöste Änderung des Tideregimes zu erkennen: Während unterhalb Hamburgs die Tidewellenlinien bei Flut und bei Ebbe nahezu den gleichen Betrag der Neigung haben, sind die Linien oberhalb Bunthaus bei Flut sehr viel weniger geneigt als bei Ebbe, was durch die starke Verformung der Tidewelle auf diesem Weg ausgelöst wird.

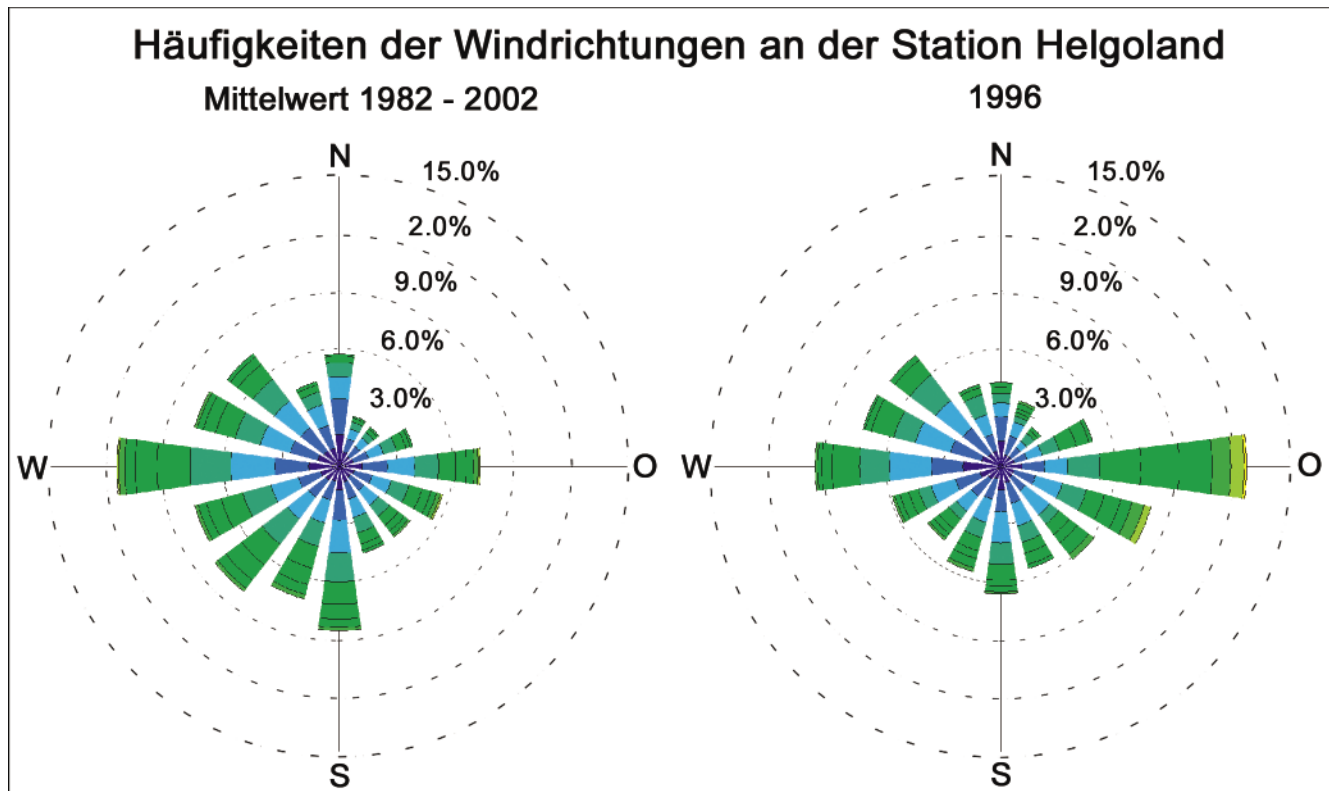


Bild 3: Häufigkeit der Windrichtungen an der Station Helgoland

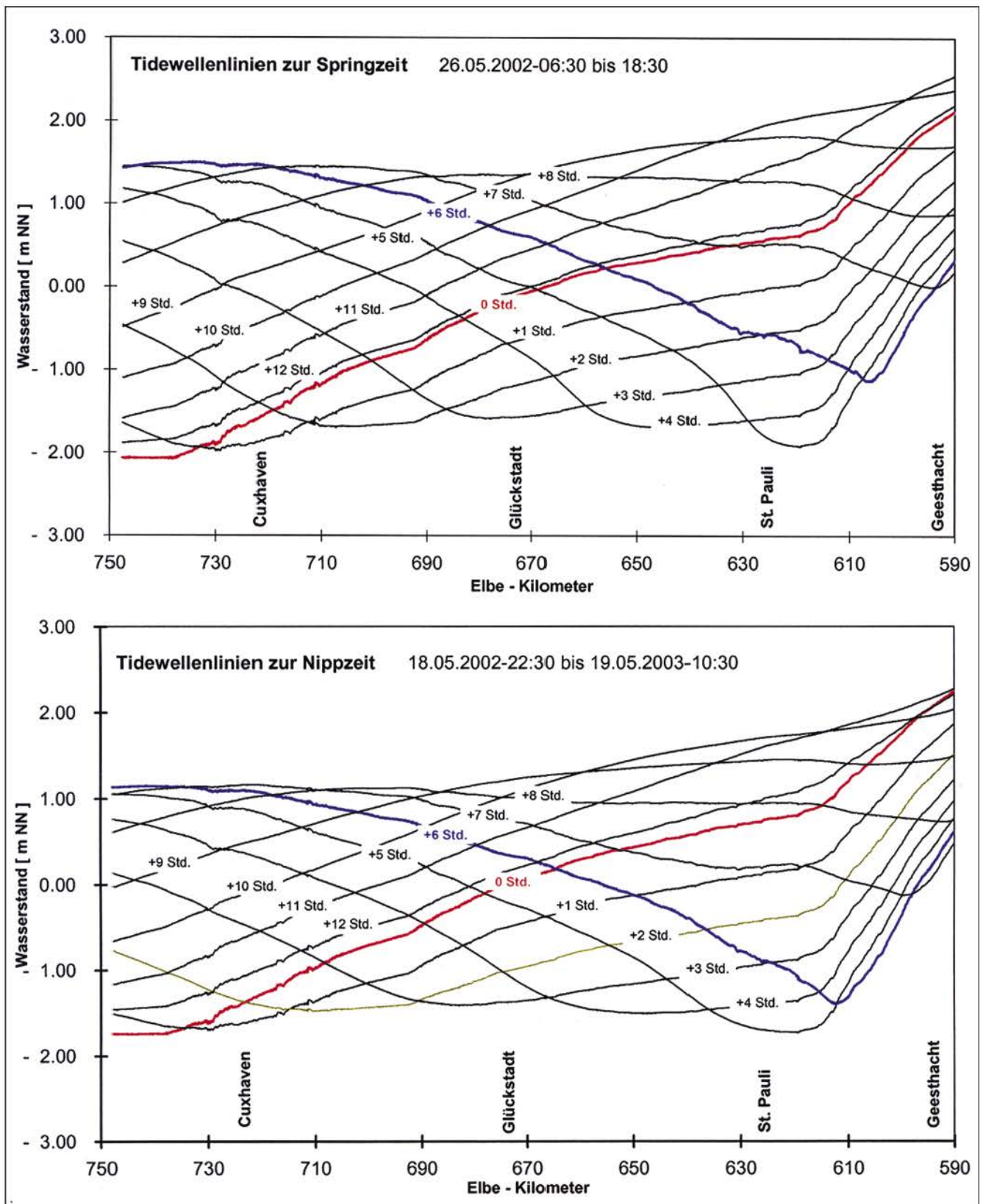


Bild 4: Tidewellenlinien zu Spring- und Nippzeit entlang der Elbe

Verformung der Tidewelle

In Bild 5 ist zu sehen, wie die Tidewelle auf ihrem Weg von der Nordsee nach Oberstrom verformt wird. Die ursprünglich nahezu sinusförmige Welle wird durch die

unterschiedliche Fortschrittsgeschwindigkeit des Wellenberges und des Wellentales so verformt, dass der Flutast steiler und der Ebbeast flacher wird. Die auf die Strömung wirkende Bodenreibung und der Oberwasserzufluss tragen ebenfalls zu diesem Phänomen

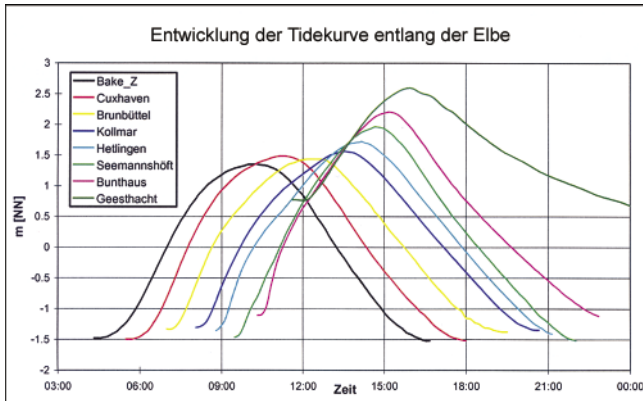


Bild 5: Entwicklung der Tidekurve entlang der Elbe

bei. Gleichzeitig ist aber auch eine Erhöhung der Gezeitenamplitude zu beobachten, die dadurch ausgelöst wird, dass die Tidewelle sowohl an Schwellen der Topographie als auch am Wehr Geesthacht reflektiert wird. Deutlich zeigt Tabelle 2 den Effekt.

Pegel	Mittlere Flutdauer (Min.)	Mittlere Ebbedauer (Min.)
Helgoland	341	404
Cuxhaven	337	408
Glückstadt	327	418
Schulau	322	423
Blankenese	314	431
St. Pauli	303	442
Zollenspieker	265	480

Tabelle 2: Flut- und Ebbedauern

Man erkennt, dass sogar die Tidekurve am Pegel Helgoland bereits durch Flachwassereffekte verformt ist. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Ebbedauer zu Lasten der Flutdauer zunimmt, je weiter die Tidewelle den Fluss hinaufläuft.

Einfluss des Oberwassers auf die Tidewelle

Der Tideverlauf wird darüber hinaus auch wesentlich von der Menge des Oberwasserzuflusses verändert. Dies zeigt Bild 6, in der die Ebbe- und Flutdauern in der Elbe bei einem Oberwasserzufluss von 300 m³/s und bei einem von 2000 m³/s dargestellt sind. Je größer der Oberwasserzufluss ist, desto länger wird die Ebbedauer und um so kürzer wird die Flutdauer, wobei der Effekt nach unterstrom hin abnimmt. Dass das Phänomen nicht einfach nur mit der Wassermenge zu erklären ist, sondern mit Resonanz und Reflexion zu tun hat, mag das Minimum des Effektes bei Glückstadt zeigen. Hier ergibt sich auf Grund der Änderung des Oberwasserzuflusses nahezu keine Änderung der Flut- und Ebbedauern.

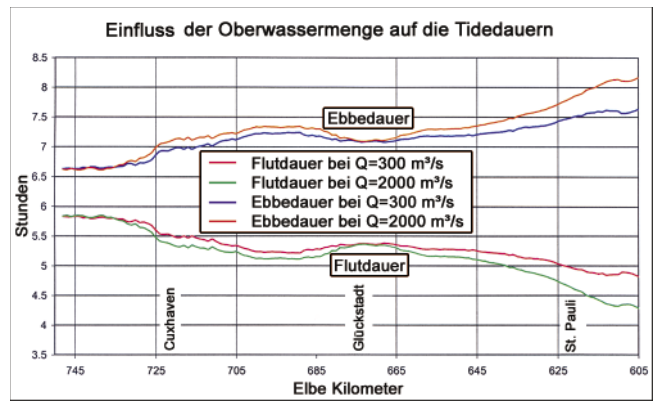


Bild 6: Einfluss der Oberwassermenge auf die Tidedauern

Die Menge des Oberwasserzuflusses beeinflusst wie in einem Binnenfluss die mittlere Wasserspiegellage in Abhängigkeit von der Flussbreite. Zusätzlich bewirkt eine Zunahme der Oberwassermenge oberhalb von St. Pauli eine Dämpfung des Tidehubes. Diese beträgt bis zu 2 m, wenn der Zufluss von 300 m³/s auf 2000 m³/s beim Wehr Geesthacht zunimmt! Wegen des dadurch veränderten mittleren Wasserstandes und auch der dadurch veränderten Strömung werden die Tidelauftzeiten beeinflusst. Wie komplex dieses Phänomen ist zeigt Bild 7: Bei großem Oberwasserzufluss wird die Laufzeit des Tideniedrigwassers gegenüber der bei kleinem Oberwasserzufluss verlängert. Die Laufzeit des Tidehochwassers wird jedoch verkürzt, was ebenfalls durch die bereits erwähnte Verformung der Tidekurve verursacht wird.

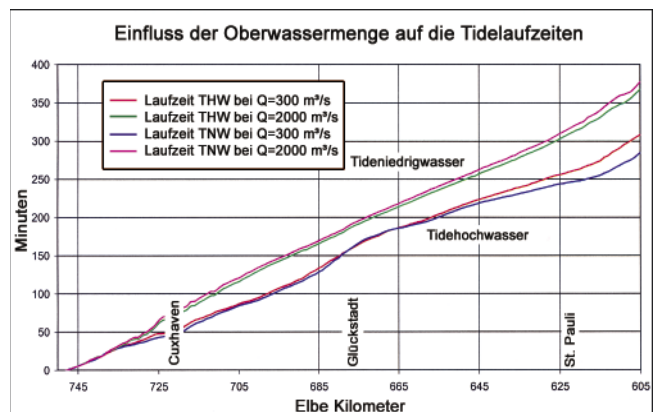


Bild 7: Einfluss der Oberwassermenge auf die Tidelauftzeiten

Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle

Aus demselben Bild ist auch die absolute Laufzeit der Tide abzulesen. Bei einem Oberwasserzufluss von 450 m³/s benötigt der Hochwasserscheitelpunkt ca. 3,5 Stunden um von Cuxhaven nach Hamburg zu gelangen, der Niedrigwasserscheitelpunkt hingegen rund 0,5 Stunden länger. Die Fortschrittsgeschwindigkeit der Tidewelle ist in erster Näherung nur von der Wassertiefe abhängig und, da diese bei Hochwasser größer ist als bei Niedrigwasser, kommt es zu den beschriebenen Unterschieden in der Laufzeit.

Windeinfluss auf die Tide

Der Einfluss des Windes bei Sturm aus Richtungen um Nordwest führt zu kräftigen Erhöhungen der Tidehochwasserstände entlang der Elbe, oft auch zu Sturmfluten, über die an anderer Stelle in diesem Heft berichtet wird. Dass Starkwind und Sturm aus Richtungen um Südost ebenfalls zu signifikanten Änderungen der Wasserstände führt, ist für die Bevölkerung weniger spektakulär, für die Schifffahrt aber eventuell viel dramatischer. Bild 8 zeigt, was ein Starkwind der Stärke 7, der über mehrere Tage weht, bewirkt: Gegenüber den vorausgerechneten Wasserständen sinkt das Tidehochwasser um bis zu 1 m ab, das Tideniedrigwasser wird immerhin noch um ca. 0,5 m erniedrigt. Diese Wirkung des Windes ergibt sich wie bei einer Sturmflut nahezu ohne Zeitverzögerung und lässt ebenso schnell wieder nach.

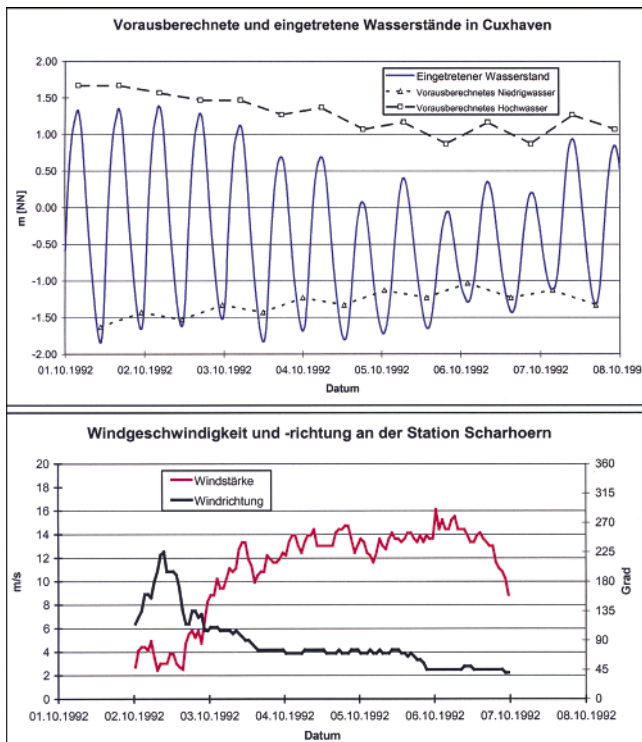


Bild 8: Einfluss eines Ostwindes auf die Wasserstände in der Elbe

Entwicklung der mittleren Wasserstände 1950 – 2000

Das Bild 9 zeigt die Entwicklung der Monatswerte der mittleren Tidehoch- und -niedrigwasserstände am Pegel Cuxhaven Steubenhöft und in St. Pauli. Während am Pegel Cuxhaven nur ein geringer positiver Trend des Tidehochwassers zu beobachten ist und das Tideniedrigwasser keinen Trend zeigt, sieht diese Entwicklung am Pegel St. Pauli deutlich anders aus. In den vergangenen 50 Jahren ist dort das MTnw um ca. 1 m abgesunken und das MThw um ca. 0,5 m angestiegen. An dieser Entwicklung haben die stattgefunde-

nen Vertiefungen des Fahrwassers der Elbe einen Anteil, der jedoch von der Art der Vertiefung abhängt. So ist z. B. die Reaktion auf durchgehende Vertiefung des Fahrwassers auf 13,6 m KN im Jahre 1976 sowohl im Tnw als auch im Thw deutlich sichtbar, eine Reaktion auf die Vertiefung im Jahre 1999 ist bisher jedoch nicht erkennbar. Im Unterschied zur durchgehenden Vertiefung 1976 ist die Vertiefung 1999 als sog. Sockelösung gebaut worden, bei der die Strecke zwischen Brunsbüttel und Wedel geringer vertieft wurde als die Bereiche in und unterhalb Hamburg und von Brunsbüttel Richtung See.

Untersuchungen der BAW haben aber auch gezeigt, dass die ohne Zutun des Menschen stattfindenden Umlagerungen im Bereich der Außen- und Unterelbe ähnlich große Effekte im Wasserstandsgeschehen hervorrufen wie Vertiefungsmaßnahmen. Als Beispiel seien hier nur die Verlagerung der Medemrinne und die Öffnung des Lüchterloches in den letzten 20 Jahren genannt.

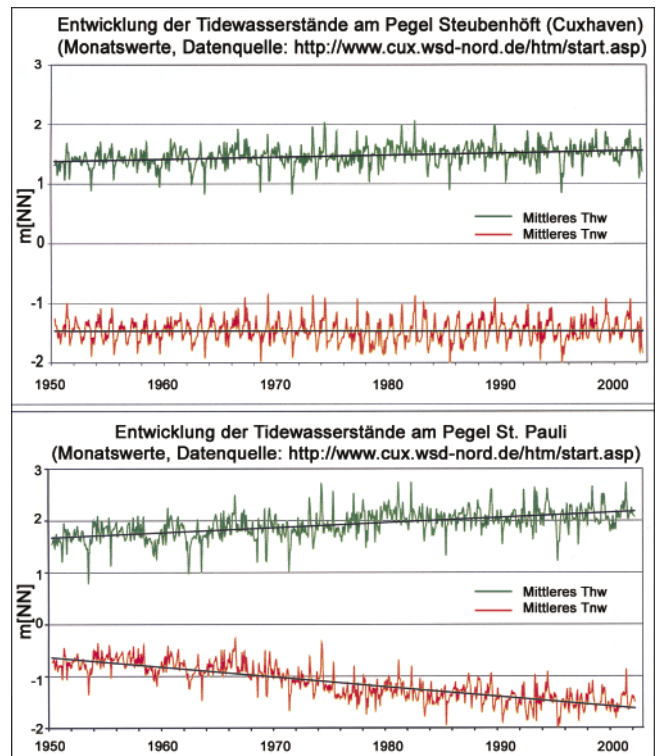


Bild 9: Entwicklung der Tidewasserstände an den Pegeln Steubenhöft (Cuxhaven) und St. Pauli

Tideverhältnisse in der Deutschen Bucht

DR. RER. NAT. GUNTRAM SEISS, DR.-ING. ANDREAS PLÜSS, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME II

Die hydrodynamischen und morphodynamischen Prozesse der Ästuargebiete stehen in direkter Wechselwirkung mit den Vorgängen in der Deutschen Bucht. Diese Vorgänge prägen die Tideparameter bis in die oberen Bereiche der Ästuar hinein. Insofern ist zum Verständnis der Tideverhältnisse in den Ästuaren die Analyse der Tidedynamik in der Deutschen Bucht (Nordsee) eine notwendige Voraussetzung.

Die Tidewelle der Nordsee wird durch zwei unterschiedliche Kräfte angeregt:

1. Die relativen Bewegungen des Mondes und der Sonne bestimmen die gezeitenerzeugenden Kräfte, welche auf den Wasserkörper der Nordsee wirken und als Eigengezeiten bezeichnet werden. Diese erzeugen Amplituden in der Nordsee von weniger als einem Dezimeter.
2. Die Tidewelle des Nordatlantiks pflanzt sich über die offenen Ränder in das Nordseebecken hinein fort. Die Wassermassen der Nordsee werden dadurch zum Mitschwingen angeregt, was zu zweidimensionalen, stehenden Wellen (Amphidromien oder Drehwellen) führt. Diese Gezeiten werden Mitschwingungszeiten genannt. Sie dominieren das Gezeitensignal bei weitem, sodass in der Analyse der Nordseegezeiten die Eigengezeiten im Allgemeinen vernachlässigt werden können.

Die Nordseetide besteht im Wesentlichen aus halbtägigen, astronomischen Signalen, von denen die halbtägige Hauptmondtide (M_2) und die halbtägige Hauptsonnentide (S_2) die bedeutendsten sind. Diese beiden Komponenten bestimmen auch überwiegend die halbmonatliche Ungleichheit der Gezeit (Spring-Nipp-Zyklus). Daneben treten eintägige Komponenten (z. B. O_1 , K_1) auf, welche die tägliche Ungleichheit der Tide bewirken.

Durch Bodenreibung und Strömungseinfluss (vorwiegend im flachen Küstensaum) verformt sich die Tidewelle und es entstehen sog. Seichtwassertiden. Diese werden als **Obertiden** durch ein ganzzahliges Vielfaches der Argumente der astronomischen Tiden gebildet oder als **Verbundtiden** durch Wechselwirkung verschiedener astronomischer Tiden erzeugt. Diese nicht-linearen Effekte beinhalten auch die Reflexion der Tidewelle sowie Oberwassereinflüsse.

Die wichtigsten Seichtwassertiden sind die vierteltägigen Komponenten (z. B. M_4), die an der Küste und in den Ästuaren eine Amplitude von bis zu zwei Dezimeter besitzen können.

Die vom Atlantik einlaufende Drehwelle (Kelvinwelle) propagiert unter dem Einfluss der Corioliskraft linksdrehend um sog. amphidromische Punkte. An ihnen verschwindet die Gezeitenamplitude des Wasserstandes. Mit zunehmender Entfernung vom amphidromischen Punkt erhöhen sich die Amplituden der Tiden in der inneren Deutschen Bucht. Für die halbtägigen Tiden besitzt die Nordsee drei dieser Punkte, deren wichtigster für die Deutsche Bucht etwa auf der Breite von Esbjerg und der Länge von Terschelling liegt. Dieser amphidromische Punkt spielt für die Anregung der Mitschwingungszeiten in den deutschen Ästuaren eine zentrale Rolle.

Modell der Deutschen Bucht

Zur Simulation der Tideverhältnisse in der Nordsee, der Deutschen Bucht und insbesondere in den Mündungsbereichen der Ästuar wurde in der Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, ein HN-Modell erstellt. Dieses wird für Tide- und Sturmflutsimulationen betrieben, um die Lage der seeseitigen Berandungen für die großräumigen Ästuargesamtmodelle zu optimieren und um diese mit den jeweils erforderlichen Randwerten zu versorgen.

Das Modell basiert auf einem unstrukturierten Dreiecksnetz, das im Bereich der Deutschen Nordseeküste stark verfeinert ist, um die Tide dort besonders naturähnlich wiederzugeben.

Das Phänomen der Drehtide (amphidromische Punkt) wird im Nordseemodell zufriedenstellend nachgebildet. Die gute Übereinstimmung der berechneten Amplituden und Phasen (Eintrittszeiten) der M_2 -Gezeit im Vergleich mit Analysen von Pegelmessungen dokumentiert Bild 1.

Am offenen, seeseitigen Rand wird das Modell durch berechnete Zeitreihen des Wasserstandes angetrieben. Diese werden aus einem Satz von harmonischen Konstanten generiert, die die lokale Form der Tide widerspiegeln. Vom Nordatlantik einlaufende Fernwellen werden durch reanalysierte Messwerte des Pegels Aberdeen erfasst. Die Wirkung des Windes auf die Hydrodynamik der Nordsee und der Deutschen Bucht wird durch Vorgabe von raum- und zeitvariablen Windfeldern über dem gesamten Modellgebiet berücksichtigt.

Diese Windfelder stammen aus der im Rahmen des HIPOCAS-Projektes (1958-2001) gewonnenen Datenbasis oder für neuere Zeiträume aus dem Vorhersagemodell des DWD.

Neben der Bestimmung von konsistenten Randwertzeitreihen für die Ästuarmodelle der BAW hat sich das Modell auch für Untersuchungen von Fragestellungen bewährt, die mit dem Küstenvorfeld der Deutschen Bucht und mit den äußeren Bereichen der Seeschiffahrtsstraßen verknüpft sind.

Einige Einsatzbereiche (Auszug) werden nachfolgend aufgelistet:

- Zusammenarbeit mit der GKSS im Projekt: Hindcast of Dynamic Processes of the Ocean and Coastal Areas of Europe **HIPOCAS**.
- Zusammenarbeit mit dem BSH zur Bestimmung der Lowest Astronomical Tide **LAT** im Bereich der Deutschen Bucht.
- Zusammenarbeit mit der Wirtschaftsbehörde Hamburg, Strom- und Hafenausbau im Rahmen des KFKI-Projektes "Charakterisierung der Tidekurve" (2000-2002).
- Untersuchung zur Baggerung einer neuen Hafeneinfahrt zum Fähranleger Wittdün/Amrum.
- Untersuchungen zur Auswirkung der Sandentnahme auf die Tidedynamik im Feld DELPHIN/Westertill.

Durch den Vergleich von zahlreichen Pegelmessungen in der Deutschen Bucht mit Modellsimulationen wurde die Qualität der Rechenergebnisse nachgewiesen.

Analysen der Tidewelle in der Deutschen Bucht

Zur Darstellung der Tidewelle wird hier die Zerlegung des Gezeitensignals in ihre harmonischen Komponenten (Partialtiden) verwendet. Die wichtigste Komponente, die halbtägige Hauptmond tide M_2 , hat eine Periode von etwa 12,5 Stunden. Aus der Analyse der Wasserstände einer Modellsimulation ergibt sich, dass die Welle innerhalb von etwas mehr als 2,5 Stunden entlang der Deutschen Nordseeküste von der Ems (Borkum) bis Nordfriesland (Sylt) propagiert. Der Wellenfortschritt erfolgt senkrecht zur Küste. Die einmündenden Ästuar werden dadurch zu eigenen longitudinalen Schwingungen angeregt. Da die Amplitude der Welle mit wachsendem Abstand zum amphidromischen Punkt zunimmt, sind insbesondere in der südöstlichen Deutschen Bucht und den Ästuarmündungen starke Amplituden der M_2 -Gezeit zu verzeichnen (vergleiche Bild 1).

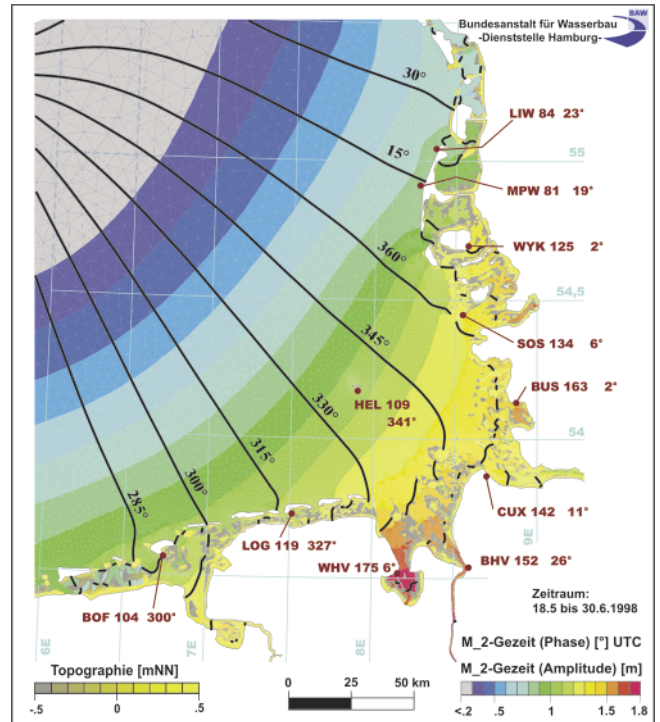


Bild 1: Vergleich der berechneten und aus Pegelmessungen analysierten Amplituden und Phasen der M_2 -Tide im Bereich der Deutschen Bucht

Zur vollständigen Beschreibung einer Teilwelle in Raum und Zeit muss auch die Strömung analysiert werden. Die Zerlegung in Teilwellen (Partialtiden) führt hier zu Stromellipsen, die über die Parameter Maximale Strömung, Verhältnis der minimalen zur maximalen Strömung sowie der Phasendifferenz zwischen Wasserstand und Stromellipse beschrieben werden (vergleiche Bild 2).

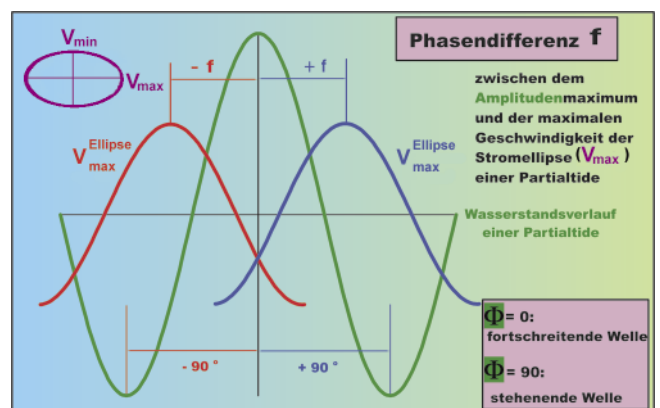


Bild 2: Phasenverschiebung zwischen Tidewasserstand und -strömung

Das Bild 3 stellt den maximalen Anteil der M_2 -Tide an der Strömung in Betrag und Richtung dar. Die durch die Pfeile angedeuteten Richtungen geben die effektive Laufrichtung der Tidewelle an. Der Wechsel der Laufrichtung im Bereich der Deutschen Bucht ist entlang einer Linie von Nordwest nach Südost klar zu erkennen. Nördlich dieser Linie setzt der Flutstrom nach Nordwest bis Nord, südlich davon nach Osten/Südosten. Zur Küste hin nehmen die maximalen Strömungen zu, die höchsten Werte treten in den Rinnen der Ästuarie und den Hauptprieln auf.

Rinnen zeigen sich, wie erwartet, alternierende Strömungen, d. h. die Ellipsen werden extrem schmal. Auf einer Linie von Wangerooge nach Büsum außerhalb der eigentlichen Ästuarie herrschen alternierende Strömungen vor, ebenso in den tiefen Rinnen.

Durch die Analyse der Phasendifferenz zwischen Wasserstand und Strömung können Gebiete bestimmt werden, in denen die Welle die Charakteristik einer fortlaufenden oder einer stehenden Welle besitzt. In der Deutschen Bucht besitzt die Tidewelle überwiegend

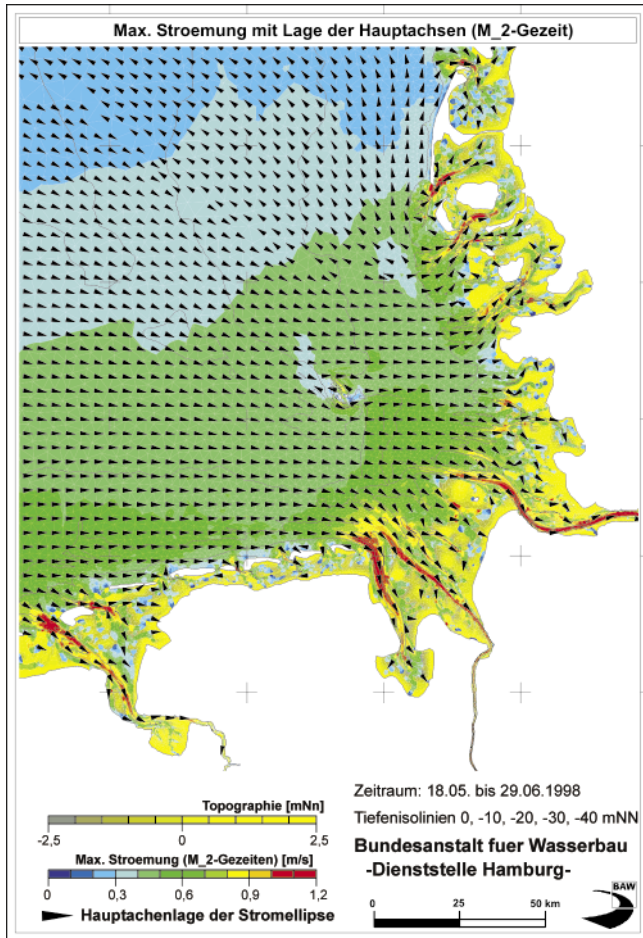


Bild 3: Maximaler Anteil und Achslage der Strömung der M_2 -Tide

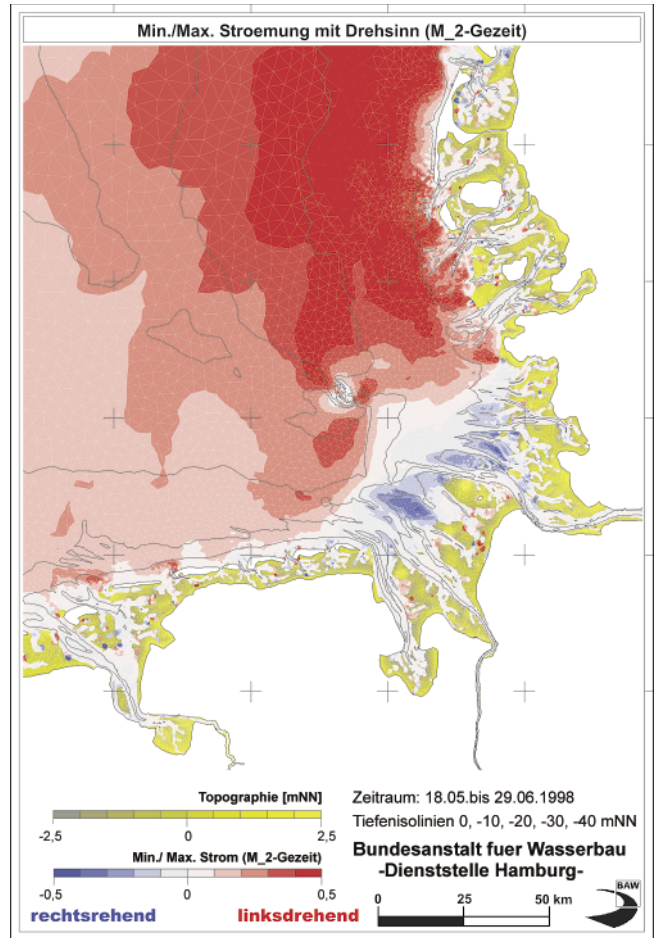


Bild 4: Verhältnis min/max Stromellipsenachse (M_2 -Tide)

Das Verhältnis der minimalen zur maximalen Hauptachse der Stromellipse ist ein Kriterium für die Verformung der Tidewelle (vergleiche Bild 4). Vom Betrag her kleine Werte entsprechen einer alternierenden Strömung; größere Verhältniszahlen weisen auf eine füllige Ellipsenform hin. Positive Werte (rot) bedeuten, dass die Partialtidenellipse gegen den Uhrzeigersinn durchlaufen wird; negative Werte (blau) bedeuten einen Umlauf im Uhrzeigersinn. Während im Tiefwasser der Deutschen Bucht die Partialtidenellipsen der M_2 linksherum durchlaufen werden, besitzen sie in den permanent überfluteten Flachwasserbereichen vor den Ästuararmündungen (insbesondere Jade, Weser und Elbe) den entgegengesetzten Drehsinn. In den

die Eigenschaften einer stehenden Welle, ebenso in der Ems und im Jade-Weser-Gebiet (dunkelrot / blau auf Bild 5). Die Ostfriesischen und Nordfriesischen Inseln sowie die Außenelbe befinden sich im Übergangsbereich zu einer fortlaufenden Welle (hellblau, gelb/grün). Hierfür ist neben der Lage der amphidromischen Punkte die Genese der Obertiden (z. B. M_4 -Gezeit) in den Flachwasserbereichen der Küste und den Ästuararmündungen verantwortlich.

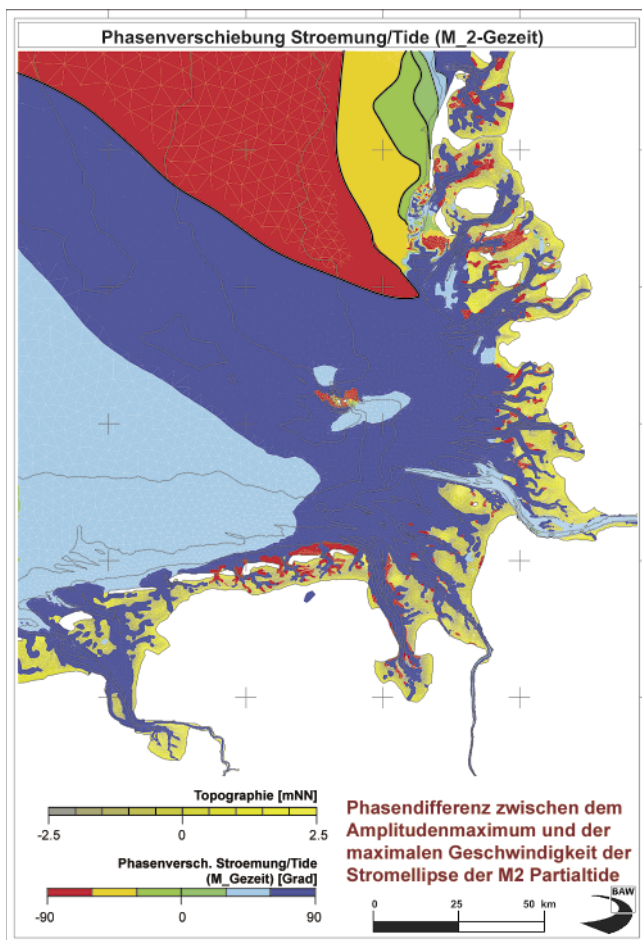


Bild 5: Phasenverschiebung Wasserstand/Strömung (M_2 -Tide)

Zusammenfassung

In der BAW, Dienststelle Hamburg, wurde ein HN-Modell erstellt, das die gesamte Nordsee und die Deutsche Bucht umfasst. Die Ergebnisse werden benutzt, um einerseits konsistente Randwerte für die Ästuarmodelle und andererseits Informationen über die Tidedynamik im Küstenvorfeld zu gewinnen.

Die Analyse der Modellergebnisse gibt Aufschluss über die Verformung der Tidewelle im Übergangsbereich von der Deutschen Bucht bis in die Ästuar.

Die Beschreibung der Tidewelle als Überlagerung einer Anzahl von Teilwellen führt zu den Tidekennwerten an einem Ort (wie z. B. Kenterpunktabstand, maximaler Flut- und Ebbestrom sowie deren Eintrittszeiten).

Eine alternative Betrachtung stellt die harmonische Zerlegung der Gezeitenwelle (Partialtidenanalyse) dar. Dabei wird der Wasserstand in eine Anzahl von Teilwellen zerlegt, für die dann die Koeffizienten berechnet werden.

Die analoge Vorgehensweise wird nun auf die Strömungsvektoren angewandt. Hier werden neben den Strömungsgrößen der Ellipsenhauptachsen auch die Lage und der Drehsinn berechnet.

Erst durch die harmonische Analyse von Strömung **und** Wasserstand ist eine ganzheitliche, flächenhafte Beschreibung der Tidewelle möglich.

Dies ist insbesondere bei der Analyse von orts- und zeitvariablen Daten aus Modellsimulationen ein wichtiges Hilfsmittel. Damit vervollständigt sich das Verständnis der Tideabläufe im Küstensaum und den Ästuaren sowie die Aussagefähigkeit bei der Beurteilung der Auswirkungen von Baumaßnahmen.

Das morphologische System des Warnow-Ästuars

DR. RER. NAT. NORBERT WINKEL, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUAR-SYSTEME II

Das morphologische System des Warnow-Ästuars umfasst die alluviale Rinne der Unterwarnow, den Breitling als ein östlich der Hauptabflussrinne gelegenes Flachwasserbecken und die Mündung der Unterwarnow in die Ostsee (Bild 1). Die Hydrographie der Unterwarnow ist wesentlich beeinflusst durch

- winderzeugte Wasserstandsschwankungen in der Ostsee,

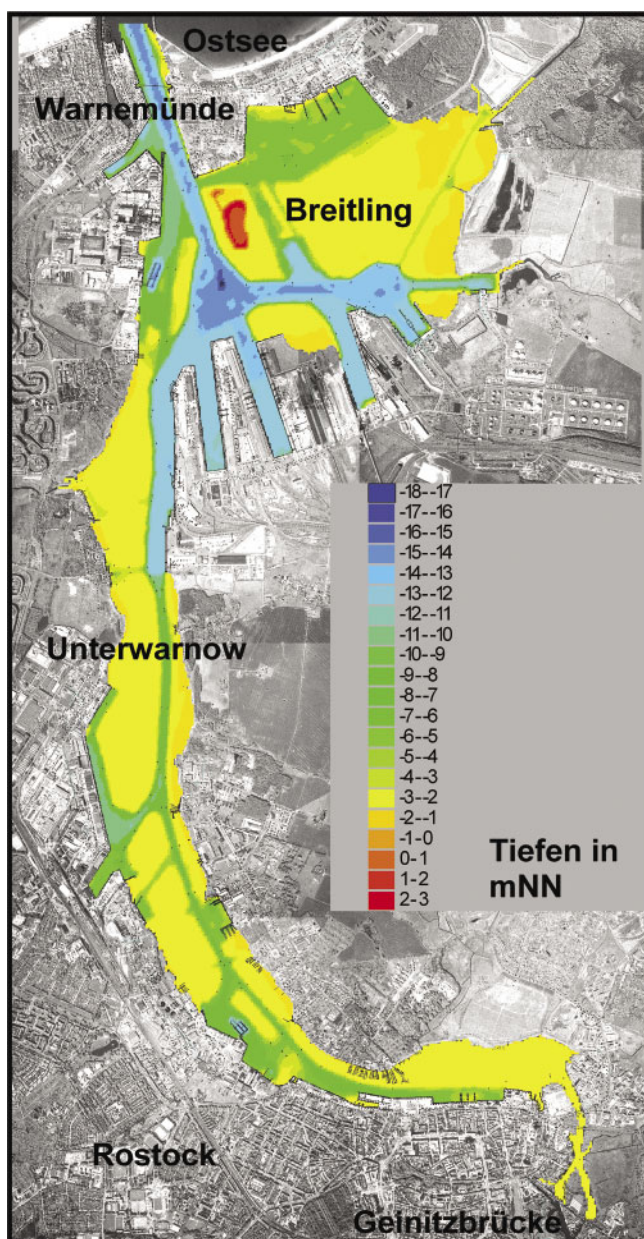


Bild 1: Die Modelltopographie des Warnow-Ästuars (Gitterabstand 20 m). © Luftbild des Landesvermessungsamtes Mecklenburg Vorpommern

- überwiegend vertikal geschichtete Salzgehaltsverhältnisse der Mecklenburger Bucht,
- den Süßwasserzufluss der Unterwarnow zusammen mit dem horizontalen Dichtegradienten zwischen Unterwarnow und Mecklenburger Bucht sowie
- vom örtlichen Windfeld.

Die Tide hat mit einem Tidehub von weniger als 2 dm nur einen untergeordneten Einfluss auf die Hydrographie. Charakteristisch für das Warnow-Ästuar ist die aus dem horizontalen Dichtegradienten resultierende Zirkulationsströmung. Das über die tiefe Rinne des Seekanals sohnah einströmende salzhaltige Wasser vermischt sich im Breitling und der Unterwarnow allmählich mit dem salzärmeren Wasser der oberen Schichten, über die das Wasser der Warnow in die Ostsee abgeführt wird (Bild 2). Hierbei ist das salzreiche Bodenwasser von dem salzärmeren Oberflächenwasser durch eine mehr oder weniger stabile Schicht getrennt. Starkwindwetterlagen führen mit den damit verbundenen Wasserstandsschwankungen in der Ostsee zu Veränderungen der Strömungsverhältnisse, aus denen ein Abbau der vertikalen Schichtung resultiert (Bild 3). Damit werden kurzfristige Veränderungen der Salzgehaltsverhältnisse hervorgerufen.

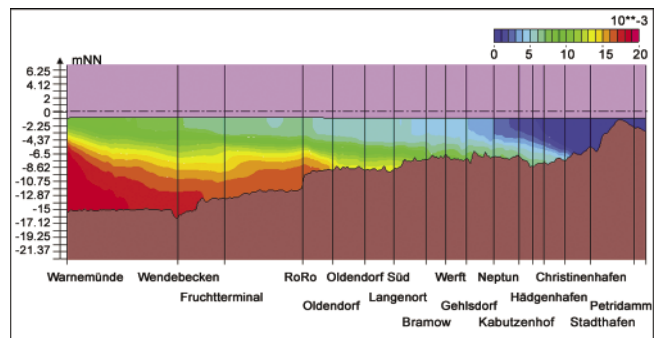


Bild 2: Salzgehalts-Längsprofil von Warnemünde bis Rostock. Modellsimulation einer vertikalen Schichtung

Die unterschiedlichen hydrodynamischen Einflüsse können mit einem dreidimensionalen hydrodynamischen-numerischen Modell für reale Zeiträume im Rahmen einer wasserbaulichen Systemanalyse untersucht werden (BAW 2002). Eine wichtige Grundlage für eine derartige Untersuchung bildet die hochaufgelöste Modelltopographie (Bild 1); denn die Morphologie des Warnow-Ästuars spielt eine wichtige Rolle bei der Ausbreitung des Salzgehaltes über die tiefen Rinnen oder auch für die Entwicklung der Strömung.

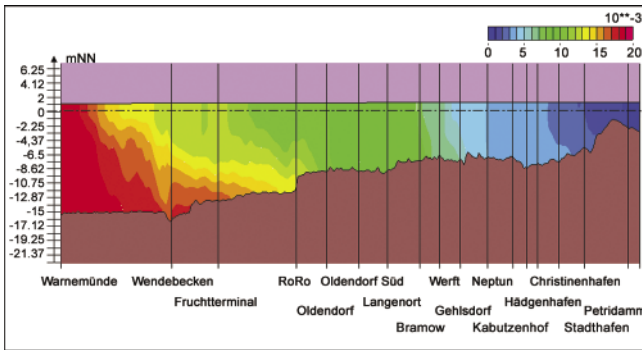


Bild 3: Salzgehalts-Längsprofil von Warnemünde bis Rostock. Modellsimulation für einen Abbau der vertikalen Schichtung

Bei geringen Wasserstandsschwankungen und kleinen Windgeschwindigkeiten können dichtebedingte Prozesse die Hydrodynamik im Warnow-Ästuar mitbestimmen. Dann hängt die Qualität des Simulationsergebnisses besonders von der Modellierung dieser Prozesse ab. Die Dichte des Wassers im Warnow-Ästuar ergibt sich durch den Salzgehalt und die Temperatur des einströmenden Ostseewassers sowie durch die Temperatur und die Menge des Oberwasserzuflusses der Warnow („Süßwasser“). Die Ausbreitung sowie die Vermischung dieser unterschiedlichen Wassermassen werden vom Wasserstand und vom Impulseintrag durch das lokale Windfeld beeinflusst. Diese Größen, die als Randwerte in die Simulation eingehen, müssen genau bekannt sein, um beobachtete Phänomene bestimmten hydrodynamischen Prozessen eindeutig zuzuordnen zu können.

Hieraus folgt, dass für Untersuchungen mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung im Rahmen einer Systemanalyse z. B. Mittelwerte nicht ausreichend sind. Ein gutes Beispiel dafür ist der Oberwasserzufluss, der häufig als Tages- oder Monatsmittelwert für Untersuchungen zur Verfügung steht. Die Bilder 4 und 5, die den gemessenen Oberwasserzufluss der Warnow an der Geinitzbrücke in Rostock (Bild 1) darstellen, zeigen, wie unterschiedlich die Ganglinien bei ähnlichen Tagesmittelwerten sein können. Die Unterschiede sind auf den Einfluss des von Menschenhand gesteuerten Wehres in Rostock zurückzuführen.

Zur Untersuchung von windbeeinflussten Situationen benötigt das numerische Modell Informationen über die Windgeschwindigkeit und die Windrichtung. Diese werden als Randwerte vorgegeben, da modelltechnisch gesehen die Gewässeroberfläche des Warnow-Ästuars auch einen Rand darstellt. Üblicherweise steht dafür der vom Deutschen Wetterdienst (DWD) in der Parkstraße von Warnemünde gemessene Wind zur Verfügung. Diese Station liegt jedoch über Land, was u. U. bedeuten kann, dass die Messung die Windsituation über dem Ästuar gar nicht oder nur teilweise beschreibt. Zur detaillierten Beschreibung der Windverhältnisse über dem Warnow-Ästuar muss ein nu-

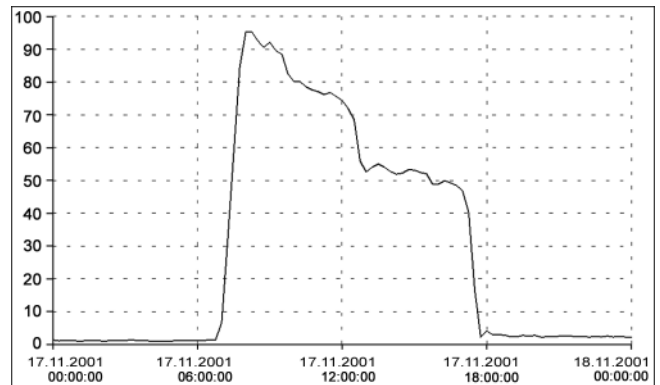


Bild 4: Die gemessene Zeitreihe des Oberwasserzuflusses der Warnow (m^3/s) an der Geinitzbrücke am 17.11.01, die vom StAUN Rostock zur Verfügung gestellt wurde

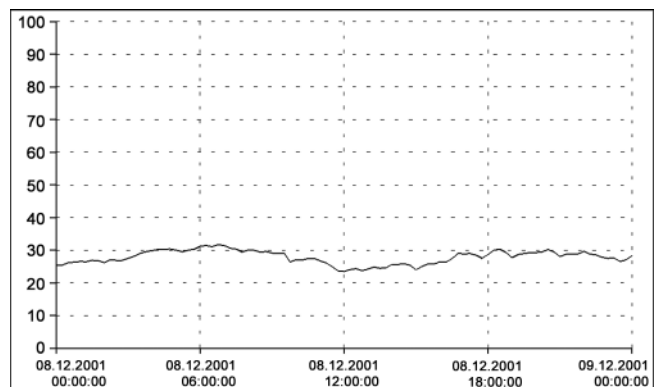


Bild 5: Die gemessene Zeitreihe des Oberwasserzuflusses der Warnow (m^3/s) an der Geinitzbrücke am 08.12.01, die vom StAUN Rostock zur Verfügung gestellt wurde

merisches Modell der Atmosphäre eingesetzt werden. Das Modell berechnet ein räumlich und zeitlich hoch aufgelöstes lokales Windfeld unter Berücksichtigung der großräumigen Wetterlage, das kleinräumig durch die Topographie und die Oberflächenrauigkeit des Geländes modifiziert wird. (DWD 1998). Die Oberflächenrauigkeit ergibt sich dabei aus der Landnutzung, die im Bild 6 dargestellt ist. Die auf diese Weise erstellten lokalen Windfelder sollten nicht nur zur Analyse der Strömung eingesetzt werden, sondern auch bei der Berechnung von Seegang (BAW 1997).

Da die hydrologischen Verhältnisse im Warnow-Ästuar maßgeblich durch die Ostsee bestimmt werden, ist dieser Einfluss bei der Untersuchung mit einem numerischen Modell zu berücksichtigen. Nicht immer stehen hierfür Messungen des Wasserstandes, der Temperatur und des Salzgehalts zur Verfügung. Um hier die Situation zu verbessern, plant die BAW, Dienststelle Hamburg, das Modell des Warnow-Ästuars an ein Ostseemodell bzw. an ein Teilmodell der Ostsee anzuschließen. Dies war prinzipiell in der Vergangenheit auch möglich, führte aber bei der Methode der Finiten Differenzen, unter Beibehaltung eines geringen Gitterabstandes (der zur Auflösung topographischer

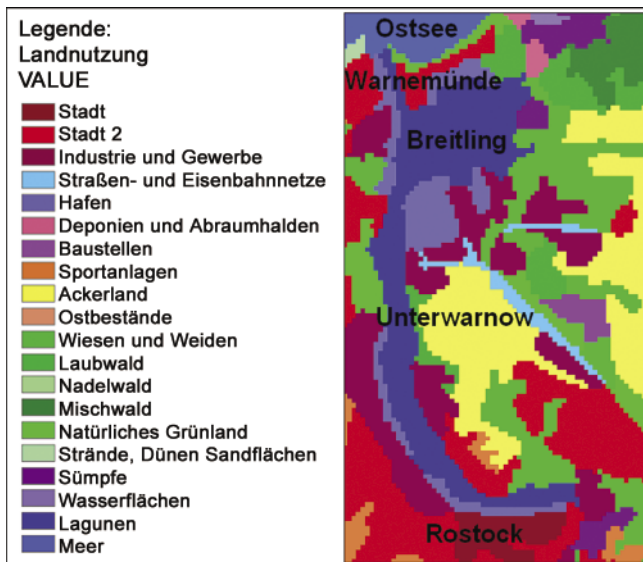


Bild 6: Karte der Landnutzung für Rostock und Umgebung.
© Statistisches Bundesamt Wiesbaden CORINE-Datensatz.

Strukturen erforderlich ist), zu einem hohen Rechenaufwand. Mit der Einführung des Modellverfahrens *UNTRIM* (Casulli und Roy, 2000) wird es zukünftig möglich sein, mit einem sogenannten unstrukturierten Gitternetz zum einen das Warnow-Ästuar adäquat aufzulösen und zum anderen die Topographie der Ostsee zu approximieren.

Literaturverzeichnis

BAW (2002): Ausbau des Marinestützpunktes Warnemünde – Auswirkungen auf die Salzgehalts- und Strömungsverhältnisse. Gutachten BAW 96 53 3455. Bundesanstalt für Wasserbau – Dienststelle Hamburg. Unveröffentlicht

BAW (1997): Gutachten zum Seegang im Marinestützpunkt Warnemünde. Gutachten BAW 96 53 3439. Bundesanstalt für Wasserbau – Außenstelle Küste. Unveröffentlicht

Casulli, Vincenzo and Roy A. Walters (2000): An unstructured, three-dimensional model based on the shallow water equations, *International Journal for Numerical Methods in Fluids* 2000, 32: 331 - 348. (http://www.hamburg.baw.de/hnm/untrim/hnm_untrim-de.htm)

DWD (1998): Regionale Windwirkung in den Ästuarbereichen der inneren Deutschen Bucht. Bericht. DWD Geschäftsfeld Seeschifffahrt

Sturmfluten in den Deutschen Ästuaren

DR. RER. NAT. ELISABETH RUDOLPH, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUAR-SYSTEME II

Herbst- und Winterstürme über der Nordsee können zu Sturmfluten an der Küste, aber auch in den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems führen. Neben Gezeitendynamik und Windstau in der Deutschen Bucht haben auch Prozesse in den Ästuaren selbst Einfluss auf die Sturmflutwasserstände in den genannten Flussmündungsgebieten. Die lokale Windwirkung über dem Ästuar, der Oberwasserzufluss in das Ästuar, aber auch die Topographie modifizieren den Sturmflutscheitelwasserstand entlang des Ästuars. Der Einsatz von hydrodynamisch-numerischen (HN-) Modellen ermöglicht es, sowohl historische Sturmfluten zu modellieren als auch durch Systemvariationen den Einfluss der genannten Prozesse auf die Sturmflutscheitelwasserstände einzeln zu untersuchen. So kann z. B. durch die Variation des Oberwasserzuflusses im HN-Modell die Bedeutung dieses Prozesses bei Sturmflut entlang des Ästuars analysiert werden.

Anhand von zwei unterschiedlichen Sturmfluten (SF76: 3. Januar 1976 und SF94: 28. Januar 1994) wird die Sturmflutempfindlichkeit als Abhängigkeit des Sturmflutscheitelwasserstandes vom Oberwasserzufluss, vom lokalen Windfeld und von der Topographie für die Ästuar von Elbe, Jade-Weser und Ems untersucht (BAW, 2000). Tabelle 1 zeigt im Überblick charakteristische Größen der gewählten Sturmfluten.

	SF76		SF94		HHQ [m ³ /s]	MNQ [m ³ /s]	MThw [mNN]
	Q [m ³ /s]	HThw [mNN]	Q [m ³ /s]	HThw [mNN]			
Elbe	500		1355		3620	277	
Cuxhaven		5,10		4,50			1,50
HH St.Pauli		6,45		6,02			2,08
Weser	250		1140		3500	80	
Bremerhaven		5,19		4,77			1,80
Vege sack		5,14		5,33			2,30
Ems	165		350		1200	38	
Emden		4,58		5,62			1,40
Papenburg		4,28		4,56			1,80

Tabelle 1: Charakteristische Größen der gewählten Sturmfluten

Zur Modellierung von Wasserstand und Strömung in windbeeinflussten Situationen, wie z. B. Sturmfluten, benötigt das HN-Modell zur Bestimmung des Impulseintrages aus der Atmosphäre Informationen zu Windrichtung und Windgeschwindigkeit über dem Ästuar. Dieser räumlich und zeitlich hoch aufgelöste lokale Wind ergibt sich aus der großräumigen Wetterlage und wird kleinräumig durch die Topographie und die Oberflächenrauigkeit des Geländes modifiziert.

Für die hier vorgestellten Untersuchungen werden die HN-Modelle TRIM-2D (Casulli, 1990) und TELE-

MAC-2D (Hervouet und Van Haren, 1996) sowie in einer Zusammenarbeit mit dem DWD GF Seeschiffahrt das meteorologische Modell MKW (Schmidt und Pätsch, 1992) eingesetzt. Den verwendeten Modelltopographien liegen Peildaten aus 1994 und früher zu Grunde.

Im Folgenden wird nicht der vom HN-Modell berechnete zeitliche Verlauf des Wasserstandes dargestellt, sondern für jeden Ort entlang des Ästuars die Analysegröße *Sturmflutscheitelwasserstand*, die den höchsten im Sturmflutzeitraum aufgetretenen Wasserstand angibt.

Einfluss des Oberwasserzuflusses

Die Bedeutung des Oberwasserzuflusses für die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände entlang von Elbe, Weser und Ems soll durch eine Sensitivitätsstudie untersucht werden. Hierfür werden die Sturmfluten SF76 und SF94 mit drei Oberwasserszenarien (siehe auch Tabelle 1) modelliert:

1. gemessenes Oberwasser;
2. mittleres niedrigstes Oberwasser MNQ;
3. höchstes bekanntes Oberwasser HHQ.

Wie bei mittleren Tiden so wird auch bei Sturmflut sowohl die Höhe des Hoch- und Niedrigwassers, die Eintrittszeit von Hoch- und Niedrigwasser sowie die Steig- und Fallgeschwindigkeit des Wasserstandes durch den Oberwasserzufluss verändert. Bild 1a zeigt den Sturmflutscheitelwasserstand entlang der Elbe während der Sturmfluten SF76 und SF94 für die drei genannten Oberwasserszenarien. Zwischen dem Wehr Geesthacht und Hamburg St. Pauli werden die Sturmflutscheitelwasserstände deutlich (> 50 cm) durch die Höhe des Oberwassers verändert. Im tieferen und breiteren Bereich zwischen Hamburg und Brunsbüttel ist der Einfluss wesentlich geringer (\approx 10 cm). Stromab von Brunsbüttel im Elbmündungsbereich hat das Oberwasser keinen Einfluss auf die Höhe der Sturmflutscheitelwasserstände. In der Weser (Bild 1b) ist der Einfluss des Oberwassers auf die Sturmflutscheitelwasserstände von der Weserbrücke bis Nordenham deutlich zu erkennen (> 50 cm). In der Außenweser stromab von Bremerhaven wird der Scheitelwasserstand nicht durch den Oberwasserzufluss verändert. Der Einfluss des Oberwassers auf die Sturmflutscheitelwasserstände (> 30 cm) in der Ems ist von Herbrum bis Papenburg zu beobachten (Bild 1c). Stromab wird die Ems tiefer und der Einfluss geringer. Mit Er-

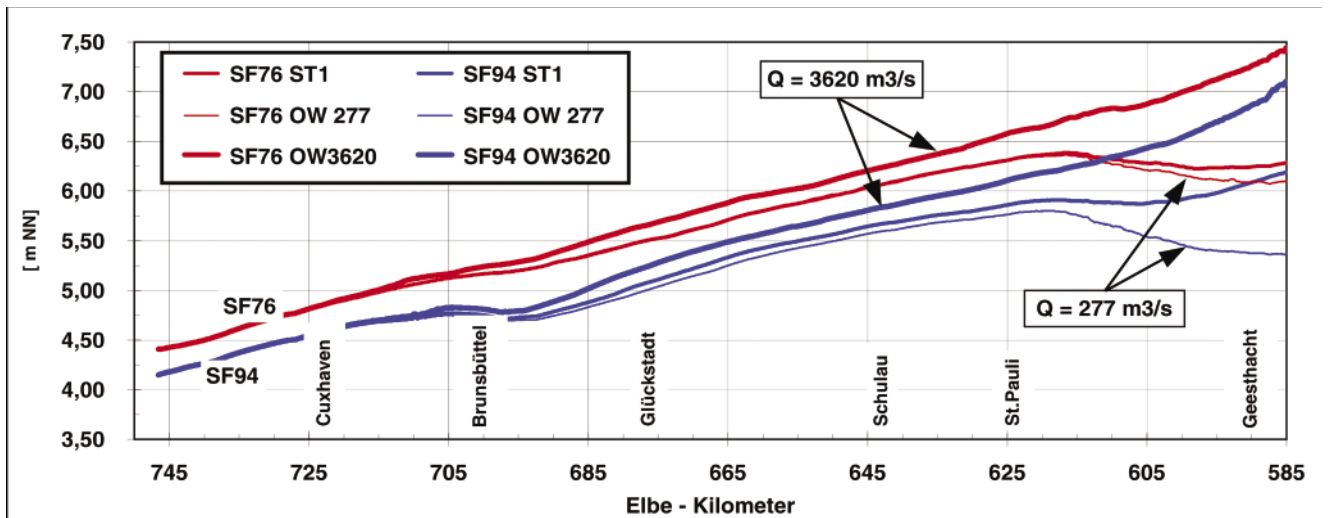


Bild 1a: Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Elbeästuars

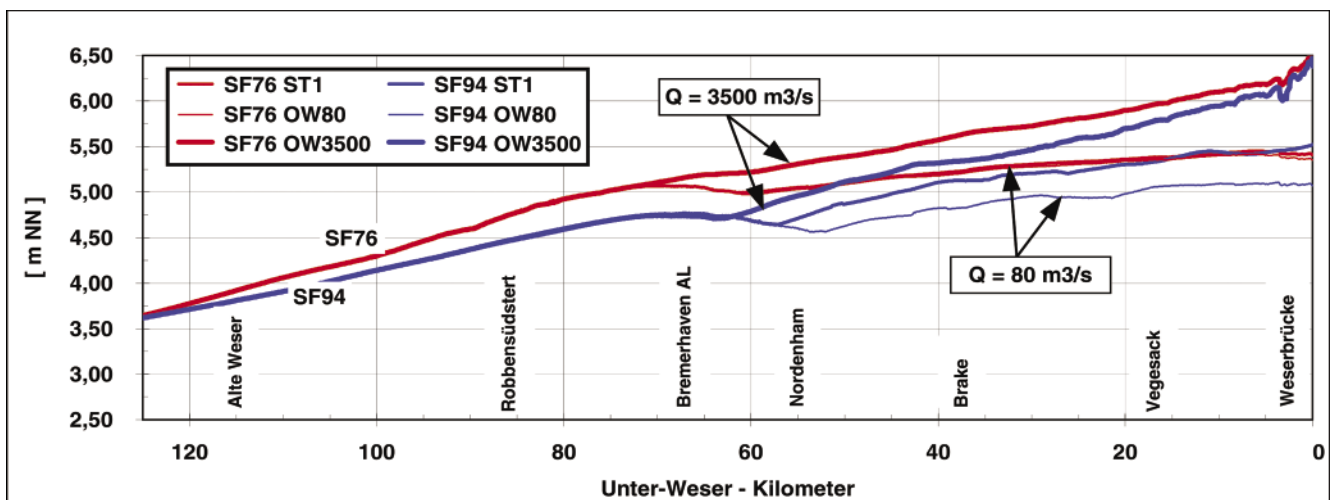


Bild 1b: Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Weserästuars

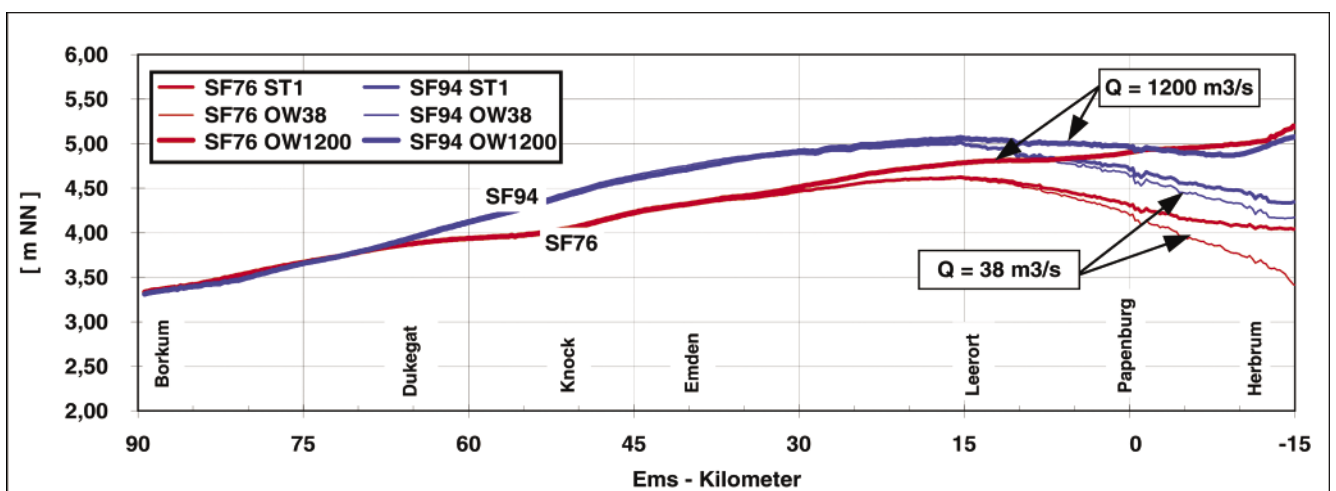


Bild 1c: Einfluss des Oberwasserzuflusses auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Emsästuars

reichen des Dollart wird der Scheitelwasserstand nicht mehr durch das Oberwasser beeinflusst.

In den oberen Bereichen der drei hier betrachteten Ästuar erhöht bzw. senkt der Oberwasserzufluss die Wasserstände bei Sturmflut deutlich (z. B. bis zu 150 cm an der Weser). Sobald die Ästuar stromab der Seehäfen breiter und tiefer werden, lässt der Einfluss nach, und ist schließlich in den Außenbereichen nicht mehr zu beobachten. Hier liegen die durch die Tide bedingten Durchflüsse mehr als zehnmals höher als der Oberwasserzufluss.

Einfluss der Topographie

Da durch die Ästuar von Elbe Jade-Weser und Ems die Zufahrtswege zu den Häfen in z. B. Hamburg, Bremen oder Emden führen, wird die Tiefe der Fahrrinne von Zeit zu Zeit an die nautischen Anforderungen angepasst. Der Einfluss der Fahrrinntiefe auf die Sturmflutscheitelwasserstände wird durch folgende Systemanalyse untersucht:

- Elbe: Anheben der Fahrrinntiefe um 4 m zwischen Hamburg St. Pauli und der Elbmündung;
- Weser: Anheben der Fahrrinntiefe um 4 m zwischen Bremen Weserbrücke und der Wesermündung;
- Ems: Anheben der Fahrrinntiefe um 2 m zwischen Papenburg und dem Dollart.

In Tabelle 2 sind die durch diese massiven Veränderungen der Fahrrinne hervorgerufenen Änderungen im Sturmflutscheitelwasserstand zusammengestellt. In allen drei Ästuaren führt eine flachere Fahrrinne zu niedrigeren Sturmflutscheitelwasserständen stromauf

Ästuar	Ort und Strom-Kilometer	Anheben der Rinne	
		SF76 Δ HW [cm]	SF94 Δ HW [cm]
Ems	Wehr Herbrum -14	-7	-6
	Weener 7	-3	-6
	Pogum 35	<1	<1
	Knock 50	<1	<1
	Dukegat 65	<1	<1
Weser	Wehr Hemelingen -4	-15	-13
	Veegesack 18	-3	-16
	Brake 39	-3	-19
	Bremerhaven 67	<1	<1
	Robbensüdsteert 80	0	<1
Elbe	Wehr Geesthacht 586	-10	-13
	Bunthaus 609N	-9	-15
	Schulau 641	-9	-16
	Brunsbüttel 696	-3	-4
	Cuxhaven 724	<1	<1

Tabelle 2: Fahrrinnenveränderungen

der breiten Mündungsgebiete. Die Sturmflutscheitelwasserstände sinken hier um 5 cm bis 20 cm. Das Anheben der Fahrrinntiefe bewirkt eine Verkleinerung des Durchflussquerschnittes und eine Vergrößerung des Effektes der Sohlreibung. Dies hat eine Abnahme der Scheitelwasserstände zur Folge. In den breiten Mündungsgebieten jedoch bedeutet eine Vertiefung des Fahrwassers nur eine geringfügige Veränderung des Durchflussquerschnittes. Der Einfluss auf die Scheitelwasserstände ist hier mit bis zu 3 cm deutlich kleiner.

Einfluss des lokalen Windes

In einer dritten Sensitivitätsstudie wird die Bedeutung des über den Ästuaren von Elbe, Jade-Weser und Ems herrschenden lokalen Windes untersucht. Die Bilder 2a bis 2c zeigen den Verlauf der Sturmflutscheitelwasserstände entlang von Elbe, Weser und Ems für SF76 und SF94.

Falls man über den Ästuaren den lokalen Wind ausschaltet, was im Gegensatz zur Natur im HN-Modell möglich ist, so stellen sich entlang der Ästuar deutlich niedrigere Scheitelwasserstände ein. Für SF76 beträgt der Unterschied bereits in Cuxhaven 30 cm und in Hamburg St. Pauli 85 cm. Auch für die Ästuar von Weser und Ems zeigt sich, dass der Einfluss des lokalen Windes für 50 cm bis 120 cm Wasserstandserhöhung verantwortlich ist. In den engeren Oberläufen der Ästuar nimmt zum einen die Fläche ab, über die Impuls aus der Atmosphäre eingetragen werden kann, zum anderen sind im Landesinneren die Windgeschwindigkeiten deutlich niedriger. Der Einfluss des lokalen Windes auf die Sturmflutscheitelwasserstände verschwindet, d. h. die Unterschiede bleiben konstant.

Aber auch die Ausrichtung des Ästuar zur Windrichtung ist von Bedeutung. Während der betrachteten Sturmfluten herrscht Wind aus westlichen Richtungen. Im West-Ost ausgerichteten Elbeästuar wird bis Schulau, d. h. bis 120 km in das Flussmündungsgebiet hinein, der zusätzliche Einfluss des lokalen Windes beobachtet. Ems und Weser verlaufen stromauf von Terborg bzw. Nordenham in Nord-Süd Richtung und reagieren somit deutlich weniger auf Westwind.

Eine Erhöhung der Windgeschwindigkeit um 10 % bewirkt in den Ästuaren von Elbe, Weser und Ems eine Erhöhung der Scheitelwasserstände um 15 cm bis 35 cm. Auch diese Windvariation beeinflusst nicht den Wasserstand im oberen Ästuarbereich.

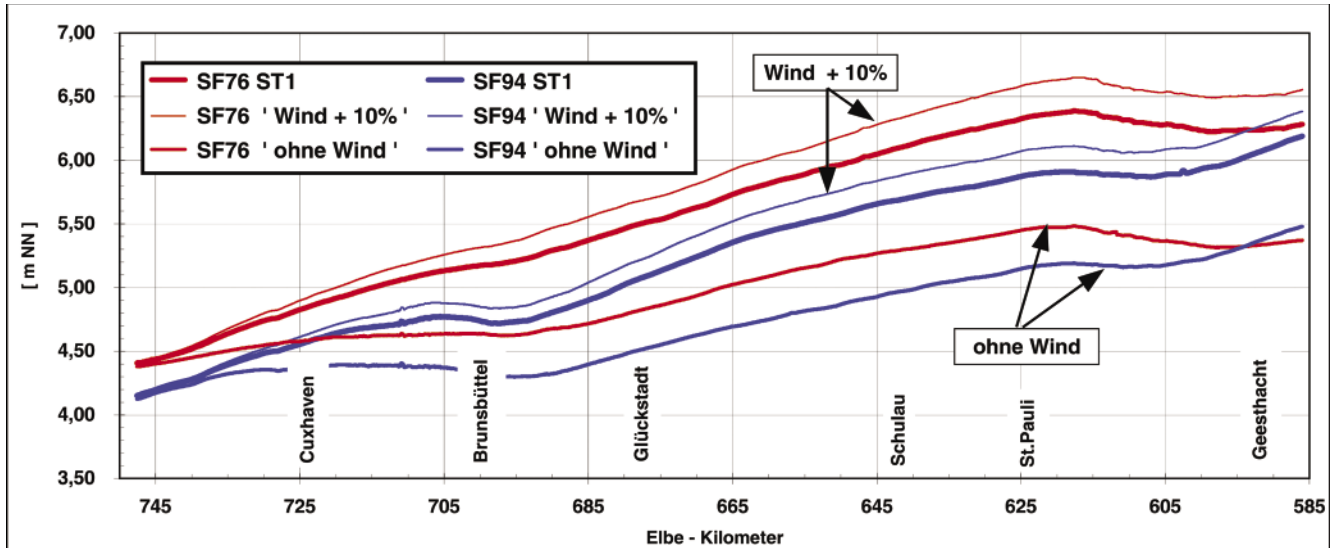


Bild 2a: Einfluss des lokalen Windes auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Elbeästuars

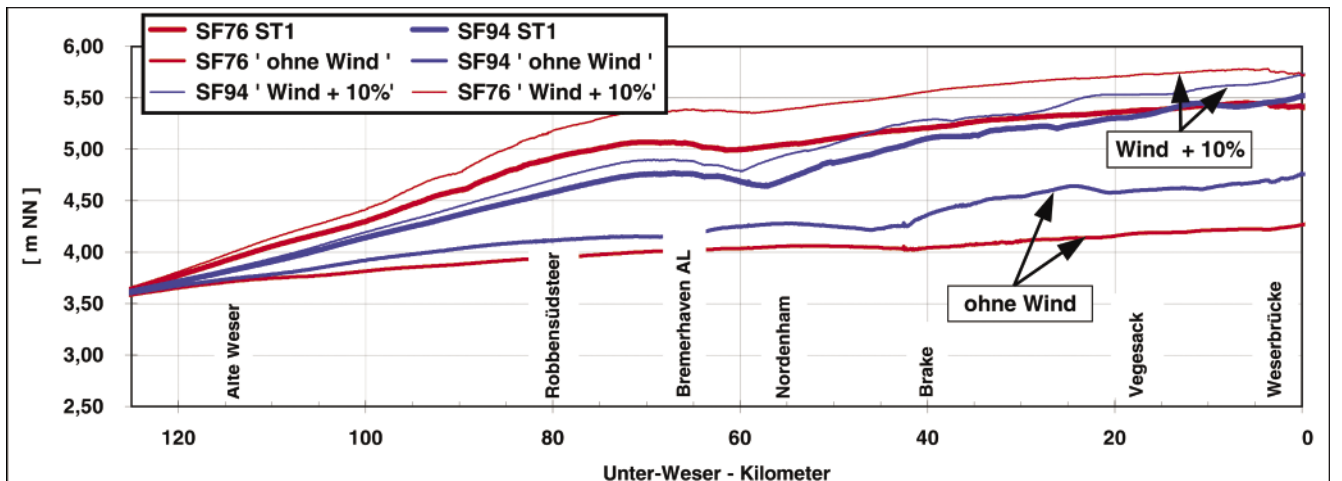


Bild 2b: Einfluss des lokalen Windes auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Weserästuars

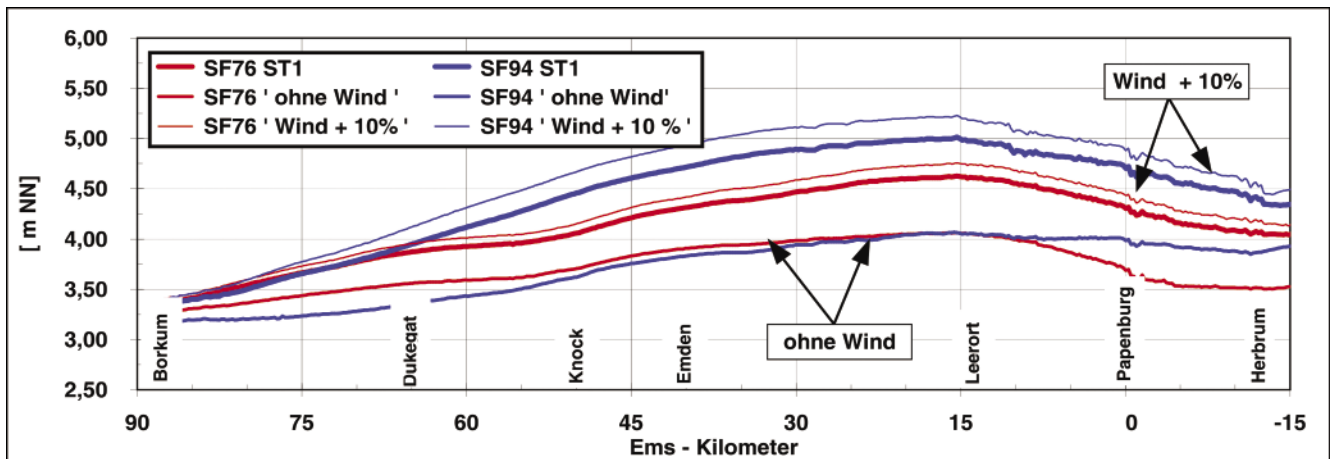


Bild 2c: Einfluss des lokalen Windes auf die Sturmflutscheitelwasserstände entlang des Emsästuars

Zusammenfassung

Die Ergebnisse der vorgestellten Sensitivitätsuntersuchungen zeigen für die untersuchten Ästuare von Elbe, Jade-Weser und Ems vergleichbare Ergebnisse.

Der Einfluss des Oberwassers ist im oberen Teil der Ästuare am größten. Die Scheitelwasserstände variieren hier oberwasserbedingt um mehr als 100 cm. Sobald das Ästuar jedoch seinen engen Flusscharakter verliert (stromab von Brunsbüttel, Bremerhaven oder Pogum) ist der Einfluss auf die Scheitelwasserstände vernachlässigbar klein.

Auch der Einfluss der Fahrrinntiefe auf die Sturmflutscheitelwasserstände ist erst stromauf der Mündungstrichter der Ästuare zu erkennen. Aber auch im Innenbereich verändern sich die Scheitelwasserstände durch das massive Anheben der Fahrrinne lediglich um 10 cm bis 15 cm.

Die in der Natur undenkbare Variante *Sturmflut ohne lokalen Wind* zeigt die Bedeutung des lokalen Impulseintrages aus der Atmosphäre für die Sturmflutscheitelwasserstände entlang eines Ästuars. Stromab von Schulau, Brake bzw. Pogum bewirkt er eine Zunahme des Scheitelwasserstandes um 50 cm bis 110 cm. Eine Erhöhung der lokalen Windgeschwindigkeit um 10 % führt in den betrachteten Ästuaren zu einer Scheitelwasserstandserhöhung von 15 cm bis 30 cm.

In den drei betrachteten Ästuaren lassen sich jeweils Bereiche identifizieren, in denen der Scheitelwasserstand empfindlich ist für Variationen des Oberwasserzuflusses, der Fahrrinntiefe oder des lokalen Windes.

Danksagung

Diese Untersuchungen wurden gefördert durch das Kuratorium für Forschung im Küsteningenieurwesen (KfKI) als BEO-Vorhaben 03KIS311.

Literaturverzeichnis

BAW (1998): HN-Verfahren TRIM-2D – Validierungsdokument. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg (www.hamburg.baw.de/hnm/trim2d/trim2d.pdf)

BAW (2000): Untersuchung regionaler Windwirkungen, hydrodynamischer Systemzustände und Oberwasserinflüsse auf das Sturmflutgeschehen in Tideästuarien. Bericht. Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg (www.hamburg.baw.de/projekte/nordsee/kfki1997/KFKI_BERICHT_BAW_00.pdf)

Casulli, V. (1990): Semi Implicit Finite Difference Methods for the Two Dimensional Shallow Water Equations. *Journal of Computational Physics* 86, 56-74.

Hervouet, J.M. und Van Haren, L. (1996). TELEMAC2D Version 3.0 Principle Note. Rapport EDF HE-4394052B, Electricite de France, Departement Laboratoire National d'Hydraulique, Chatou CEDEX.

Schmidt, H. und Pätsch, J. (1992): Meteorologische Messungen auf Norderney und Modellrechnungen. *Die Küste* 54, 131-142.

Grundlagen für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs

Grundlagen für die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs

Untersuchungen zur Nautischen Sohle

Dipl.-Ing. Frank Liebetruth, Dipl.-Ing. Fritz Eissfeldt, Bundesanstalt für Wasserbau, Dienststelle Hamburg, Referat Geotechnik Nord

Einleitung

Die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung des Bundes (WSV) hat die schiffbare Tiefe (Nautische Sohle) in den Bundeswasserstraßen und Häfen vorzuhalten. Probleme stellen die Bereiche dar, an deren Gewässersohle Schlick sedimentiert, dessen mechanischen Eigenschaften von seiner Zusammensetzung, seinem Alter und seiner Schichtstärke abhängig sind. Im flüssigen Zustand als Sedimentsuspension (Fluid Mud) ist eine Durchfahrt und Steuerbarkeit von Schiffen noch möglich. Mit zunehmender Festigkeit bzw. Viskosität muss der Schlick jedoch gebaggert werden, um die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs sicherzustellen. Die Nautische Sohle im Schlick (Bild 1) ist daher definiert als derjenige Horizont, von dem ab die physikalischen Eigenschaften des Schlicks einen kritischen Grenzwert annehmen, bei der die Steuerbarkeit und Manövrierfähigkeit des Schiffes nicht mehr gewährleistet ist.

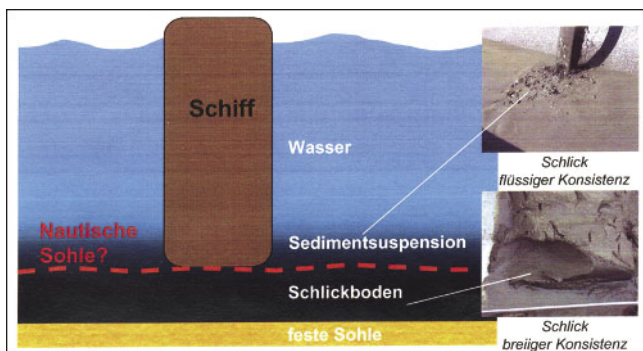


Bild 1: Nautische Sohle im Schlick

Dieser Horizont liegt in Schlickrevieren im Bereich zwischen Sedimentsuspension - auch als schwarzes Wasser oder Fluid Mud bezeichnet - und dem Schlickboden, also mehr oder weniger konsolidiertem Schlick. Aus geotechnischer Sicht kann Schlick als sedimentierender flüssig breiiger Boden klassifiziert werden, der thixotrope Eigenschaften besitzt und sich auf der Gewässersohle bildet. Die Hauptkornfraktionen bestehen aus organischem Schluff und Ton mit unterschiedlichen Feinsandanteilen.

Die Festlegung der Nautischen Sohle ist von drei wesentlichen Faktoren abhängig. Das sind zunächst die hydrodynamischen Einflüsse aus der Wechselwirkung Schiff/Wasserstraße, die wegen der verschiedenen Schiffsformen, Schiffsgeschwindigkeiten und Schiffsantriebe nur schwierig zu beurteilen sind und weiterer Forschung des Wasserbaus bedürfen. Die nautischen

Belange zur Beurteilung der Steuer- und Manövrierfähigkeit eines Schiffes sind von den Nautikern zu beantworten. Aus geotechnischer Sicht maßgebend für die Festlegung der Nautischen Sohle sind die geotechnischen und rheologischen Eigenschaften des Schlicks.

Der internationale Stand des Wissens zur Nautischen Sohle ist in dem Schlussbericht der gemeinsamen PIANC-IAPH Arbeitsgruppe II-30 von 1997 zusammengefasst. Danach sind für Schlick geringere Dichte und Scherfestigkeit in Wasserstraßen und Häfen Kriterien zur Festlegung der Nautischen Sohle angegeben. Neben der Echolotung als flächige Detektionsmethode werden rheologische und dichtebezogene Messungen als punktuell Verfahren genannt. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt werden eine Reihe von Untersuchungsverfahren mit jeweils unterschiedlichen Festlegungen für die Nautische Sohle angewandt. Um sie in ihrer Aussagefähigkeit und praktischen Verwendbarkeit für die Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) bewerten und präzisieren zu können, wurden unter Federführung der BAW in den vergangenen Jahren Vergleichsuntersuchen im Labor und in-situ durchgeführt.

Grundlagen

Der bodenmechanisch physikalische Parameter zur Beschreibung der Adhäsionskräfte Schiff/Schlick ist die undrained Scherfestigkeit c_u . Sie repräsentiert eine Schubbeanspruchung im Schlick beim Eintauchen eines Schiffes und spiegelt die Reibung als Verhältnis von Antriebskraft zu Kontaktfläche wieder.

Die undrained Scherfestigkeit c_u als maßgebender geotechnischer Parameter für die Nautische Sohle hängt von einer Reihe von bodenphysikalischen Parametern wie der Korngrößenverteilung, organischem Anteil, Kalk-, Wasser-, Gas- und Salzgehalt, sowie Porenzahl und Feuchtdichte ab. Derzeit erfolgen Angaben zur Nautischen Sohle im Schlick auf der Grundlage von Dichtemessungen und der kornanalytischen Auswertung von Bodenproben unter Beachtung vorhandener revierspezifischer Korrelationen zwischen undrained Scherfestigkeit c_u und Dichte ρ (Rechlin, D. 1996, HANSA). Die Auswertung der ρ/c_u -Diagramme verschiedener Häfen und Schlickreviere im In- und Ausland ergab als Grenzwert für die undrained Scherfestigkeit einen Wert von $c_u = 128 \text{ N/m}^2 \pm 19 \text{ N/m}^2$. Für die Nautische Sohle der WSV-Wasserstraßen wird eine undrained Scherfestigkeit $c_u = 120 \text{ N/m}^2$ zu Grunde gelegt. Über korrelative Beziehungen (Rechlin, D. 1996, HANSA) lässt sich abhängig von

Korngrößenverteilung und undrännierter Scherfestigkeit bei $c_u = 120 \text{ N/m}^2$ die dazugehörige Grenzdichte ableiten. Der Zusammenhang zwischen Dichte ρ und undrännierter Scherfestigkeit c_u weist jedoch teilweise Streuungen auf und auf Grund seiner thixotropen Eigenschaften kann Schlick gleicher Dichte unterschiedliche Festigkeiten annehmen.

Eine Alternative zur undrännierten Scherfestigkeit c_u stellt die Viskosität η als rheologischer Parameter dar (Dasch, W.; Wurpts, R. 1999, HANSA). Die Viskosität ist der Widerstand einer Flüssigkeit gegen mechanische Verformungen infolge Schubspannung. Die Viskosität ist definiert als der Quotient aus der Schubspannung und der Scherrate bzw. Schergeschwindigkeit. Wegen seiner thixotropen Eigenschaften zählt Schlick zu den nicht-Newton'schen Stoffen. Das bedeutet, dass bei Belastungssteigerung eine Verflüssigung einsetzt, die sich zeitverzögert wieder vollständig zurückbilden kann. Schlick besitzt somit eine Strukturfestigkeit.

Um rheologische und geotechnische Untersuchungsergebnisse miteinander vergleichen zu können, wurden Vergleichsmessungen in mit Schlick gefüllten Schuten unter gleichen Randbedingungen durchgeführt. Dabei kamen die bisher verwendeten geotechnischen Untersuchungsverfahren und neu konzipierte rheologische Viskositätssonden zum Einsatz.

Aus den Schutenversuchen erwies sich die „Nautisonde“ von Consulting Dr. Dasch u. a. wegen der feinen Auflösung als eine gute Alternative zur bisher in der Praxis eingesetzten Dichtesonde. Mit den Messpaddeln der Nautisonde wird eine Scherbeanspruchung im Schlick erzeugt und gemessen. Diese Scherbeanspruchung ist übertragbar auf eine Schiffsdurchfahrung im Schlick. Die für die Scherbeanspruchung im Schlick notwendigen Kräfte werden von integrierten Sensoren gemessen. Kalibriert ist die Nautisonde an Newton'schen Flüssigkeiten mit genormten Rotationsrheometern. Über korrelative Beziehungen ergibt sich der rheologische Parameter Viskosität η (Pa·s).

Da sowohl bei der Flügel- als auch bei der Nautisonde eine Scherbeanspruchung im Schlick erzeugt und gemessen wird, erfolgte eine Kalibrierung der Nautisonde an der Flügelsonde unter Laborbedingungen (Bild 2).

Es ergab sich ein korrelativer Zusammenhang zwischen der undrännierten Scherfestigkeit c_u (Pa) und der Viskosität η (Pa·s) von:

$$c_u \cong 7 \cdot \eta$$

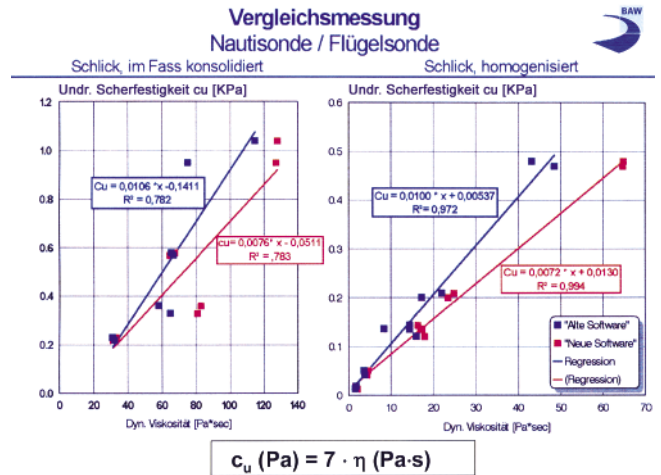


Bild 2: Korrelativer Zusammenhang zwischen undrännierter Scherfestigkeit c_u und Viskosität η aus Vergleichsuntersuchungen an Schlickten unterschiedlicher Dichte

WSV - Praxis

In der WSV erfolgt die revierspezifische Festlegung der Nautischen Sohle und damit verbundener Unterhaltungsbaggerungen mit Zweifrequenzecholotverfahren in Verbindung mit der Dichte-(Isotopen-)sonde. Durch unterschiedliche Schwebstoffgehalte (Organikanteile), Sandeinlagerungen (Dichtegradien) u. a. werden nicht selten mehrere Horizonte im Schlick detektiert und zusätzlich die revier- und jahreszeitabhängigen Grenzdichten beeinflusst. Es hat sich in verschiedenen Schlickrevieren gezeigt, dass mit den üblichen Zweifrequenz-Echolotpeilungen verschiedene Schlickhorizonte über die Tiefe nicht zufriedenstellend detektiert werden sowie geotechnische und rheologische Eigenschaften den Sedimentsuspensionen und Schlickböden nicht zugeordnet werden können.

Beispiel Brunsbüttel

Das nachfolgende Bild 3 zeigt ein Beispiel aus den Vorhäfen Brunsbüttel.

Dargestellt sind Peilpläne eines WSV-Zweifrequenz-echolotes für zwei Längsprofile. Die Messungen erfolgten zeitgleich bei einem Abstand zwischen den beiden Längsprofilen von nur 12 m. Bei dem oberen Peilplan wurde über das gesamte Längsprofil eine durchgängige Schlickschicht detektiert. Im unteren Peilplan (rechts) liegt das Peilniveau der 100 kHz und 15 kHz-Frequenz annähernd auf gleicher Höhe. Danach ist in diesem Streckenabschnitt keine Suspension vorhanden. Der Übergang zur festen Sohle befindet sich oberhalb der Sollsohle, sodass zur Gewährleistung der Sicherheit des Schiffsverkehrs Baggermaßnahmen notwendig wären.

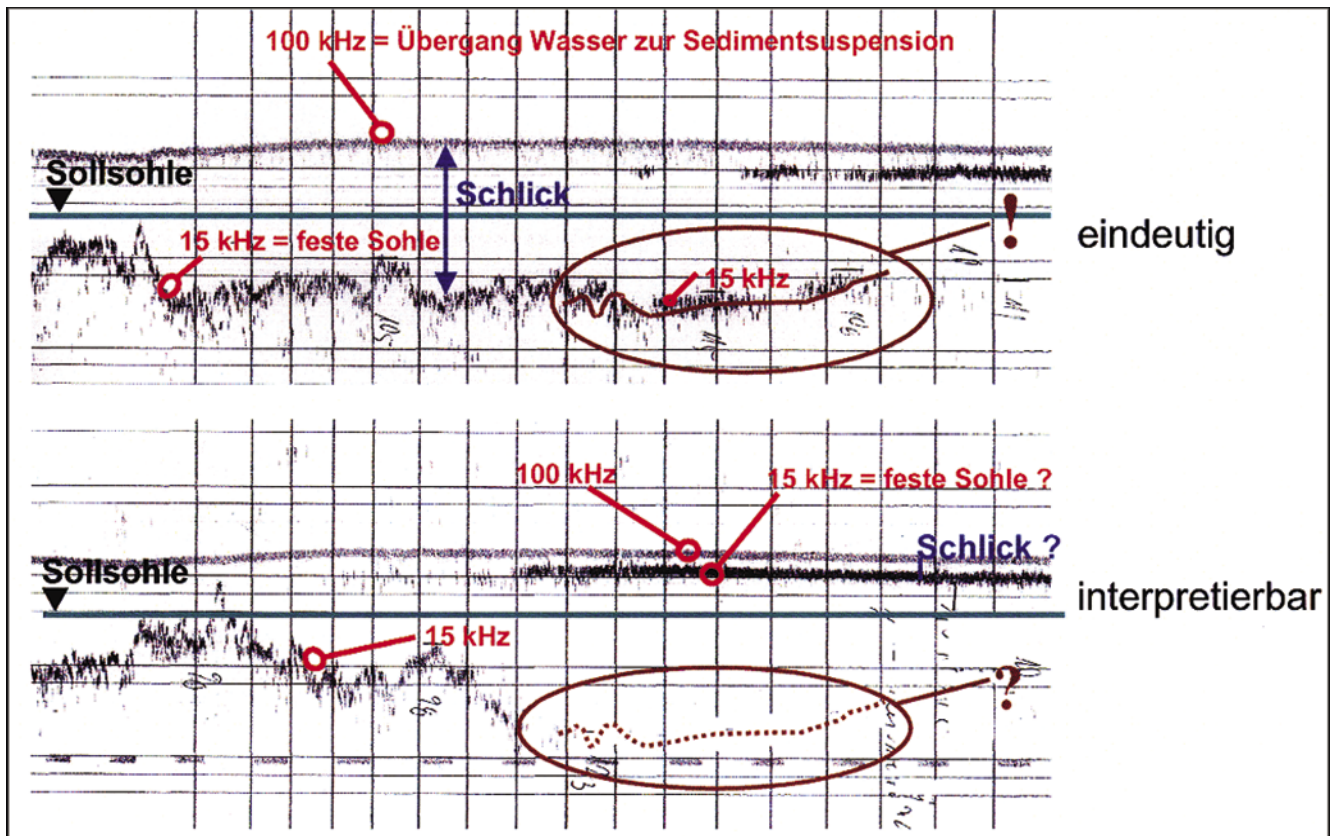


Bild 3: WSV-Peilplotpläne aus den Vorhäfen Brunsbüttel

Um die Peilergebnisse auf ihre Aussagefähigkeit zu beurteilen und Aussagen zu den geotechnischen Eigenschaften der detektierten Suspension hinsichtlich Schiffbarkeit zu machen, wurden von der BAW Vergleichsmessungen vorgeschlagen und durchgeführt. Im Vorfeld dieser Untersuchungen erfolgten bereits in verschiedenen Schlickrevieren der WSV Vergleichsuntersuchungen zur Detektion der Nautischen Sohle mit am Markt angebotenen geophysikalischen, rheologischen und geotechnischen Untersuchungsverfahren. Im Ergebnis dieser Vergleichsuntersuchungen wurden in Brunsbüttel folgenden Messverfahren und -geräte eingesetzt:

Geophysikalische Messverfahren:
Peilungen mit dem

- Zweifrequenzecholot der WSV
- Mehrfrequenzecholotverfahren DSLP der Firma General Acoustics
- Sedimentecholot SAS 96 der Firma Innomar

Rheologische punktuelle Messverfahren:

- Nautisonde von Consulting Dr. Dasch

Geotechnische punktuelle Messverfahren:

- Dichte-(Isotopen-)sonde
- Kernentnahmegerät zur Probengewinnung für Laborversuche.

Die Ergebnisse der Vergleichsuntersuchungen sind auf dem nachfolgenden Bild 4 dargestellt.

Mit dem Zweifrequenzecholot der WSV wurde keine Schlickschicht festgestellt. Sowohl die hohe 100 kHz Frequenz, die üblicherweise den Übergang vom Wasser zur Sedimentsuspension anzeigt, als auch die niedrige 15 kHz Frequenz, mit der der Übergang zur festen Sohle festgelegt wird, liegen auf einem Horizont. Mit dem DSLP-Verfahren hingegen wurde eine Schlickschicht ermittelt und die Grenzflächen nach General Acoustics als Materialphasen flüssig und fest hochauflösend detektiert. Auch mit dem Sedimentecholot wurde diese Schlickschicht bestimmt und die Grenzübergänge in ähnlicher Höhenkote wie vom DSLP-Verfahren ermittelt. Nach den bisher in der BAW gemachten Erfahrungen eignen sich zur Festlegung der Nautischen Sohle und damit der maßgebenden Baggersohle derzeit nur die punktuellen Messverfahren Nautisonde und Dichtesonde. Im Revier Brunsbüttel lagen die Ergebnisse dieser punktuellen Messverfahren fast auf gleicher Höhenkote.

Durch die vergleichenden Messungen mit unterschiedlichen Messverfahren und -geräten konnten die Widersprüche nach Bild 3 in Brunsbüttel geklärt und die Nautische Sohle näher bestimmt werden. Baggermaßnahmen waren nicht erforderlich.

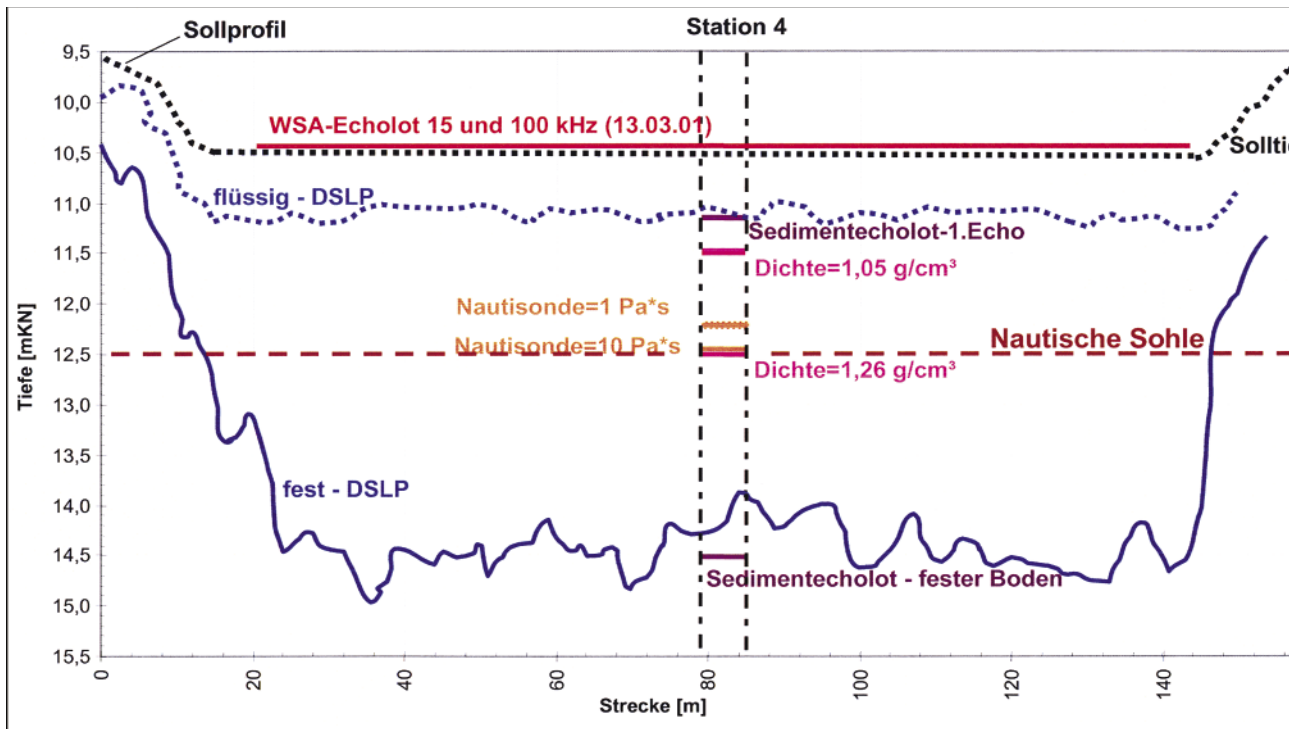


Bild 4: Messergebnisse Querprofil 4, Vorhären Brunsbütte

Beispiel Moderortrinne

Die Zuverlässigkeit von Messergebnissen ist am besten in Naturversuchen zu prüfen. Diese Naturmessungen wurden in der Moderortrinne des südlichen Peenestromes mit einem für dieses Revier typischen Binnenschiff durchgeführt. Neben den geophysikalischen, rheologischen und geotechnischen Messungen wurden zusätzlich fünf Fahrversuche mit umfangreichen Messungen zur Fahrdynamik des Schiffes in den Fahr-

wasserrandbereichen durchgeführt. Beurteilt wurde die Steuerfähigkeit und Manövrierbarkeit des Schiffes bei der Fahrt durch Schlick. Weiterhin dienen die Messergebnisse der Verifizierung der geotechnischen und rheologischen Grenzwerte. In Bild 5 sind die Messergebnisse für die Versuchsfahrt im grünen Tonnenstrich aufgetragen.

Das Bemessungsschiff ist bei extrem außermittiger Fahrt im grünen Tonnenstrich durch ca. 40 cm mäch-

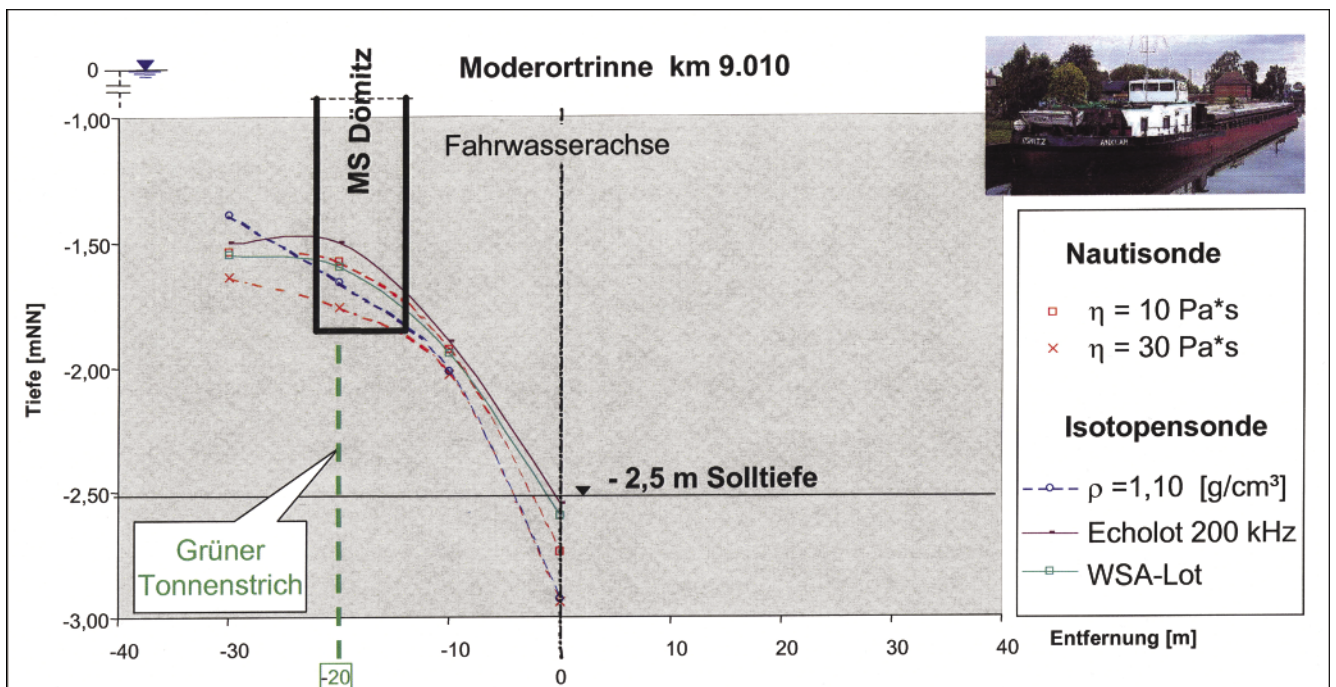


Bild 5: Messergebnisse Querprofil 1, Moderortrinne

tigen Schlick im Grundsatz mit eingeschränkter Leichtigkeit steuerbar gewesen und hat dabei die Sedimentschicht sogar unterhalb der festgelegten Grenzwerte von $\eta = 10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ und einer Grenzdicke von $\rho = 1,10 \text{ g/cm}^3$ durchfahren. Bei Begegnungsverkehr ist allerdings eine erhöhte Aufmerksamkeit des Schiffsführers notwendig.

Fazit

Im Ergebnis aller bisher durchgeführten Vergleichsuntersuchungen wird die geotechnische Definition zur Ermittlung der Nautischen Sohle im Schlick aus der Sicht der BAW wie folgt festgelegt (Bild 6):

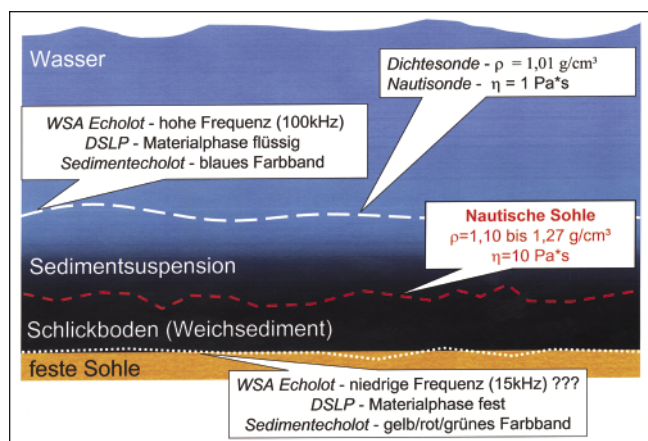


Bild 6: Definitionen zur Nautischen Sohle aus geotechnischer Sicht

Der Übergang von Wasser zur Sedimentsuspension kann genähert durch die hohe Frequenz des Zweifrequenzecholotes, mit dem DSLP-Verfahren durch die Materialphase flüssig sowie durch das erste Echo bzw. blaue Farbe mit dem Sedimentecholot ermittelt werden. Mit den punktuellen Verfahren kann diese Grenzfläche mit einer Feuchtdichte von $\rho = 1,02 \text{ g/cm}^3$ und einer Viskosität von $\eta = 1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ beschrieben werden.

Der Übergang vom Schlackboden zur festen Sohle kann genähert mit der niedrigen Frequenz des Zweifrequenzecholotes, durch die Materialphase fest des DSLP-Verfahrens und dem gelb-rot-grünen Farbband des Sedimentecholotes festgestellt werden.

Die Ermittlung der Nautischen Sohle ist nach den vorliegenden Ergebnissen vorerst nur mit der Nautisonde bei einer Viskosität von $10 \text{ Pa} \cdot \text{s}$ revierunabhängig und mit der Dichtesonde abhängig von der Korngrößenverteilung des Schlicks zum jeweiligen Zeitpunkt der Untersuchungen durch eine revierspezifische Grenzdicke von $\rho = 1,10 \text{ bis } 1,27 \text{ g/cm}^3$ möglich. Kalibriert an den punktuellen Messungen der Nautisonde oder Isotopsonde können mit dem DSLP-Verfahren und dem Sediment-Echolotverfahren die Eigen-

schaften des Schlicks jedoch weiter klassifiziert und Schichthorizonte angegeben werden.

Sowohl die Dichte- als auch die Nautisonde können als punktuelle Messverfahren nur zur Kalibrierung flächiger Detektionsmethoden dienen.

Mit den o. g. DSLP- und SAS 96-Verfahren kann mit größerem Auswertumfang und zusätzlichen Informationen aus punktuellen Dichte- und Viskositätsmessungen die Auswertequalität gegenüber einem Zweifrequenzecholot deutlich verbessert werden.

Ausblick

Im September 2003 führt die BAW in Zusammenarbeit mit dem Wasser- und Schifffahrtsamt Emden Messungen im Schlick der Ems durch. Neben den bereits vorgestellten geophysikalischen Verfahren sollen auch die neu am Markt angebotenen geophysikalische Messverfahren „admodus“ der Fa. Dr. Greiser und Partner sowie das Verfahren „Silas“ der Firma Stema eingesetzt werden.

Neben dem Vergleich und der Bewertung der Messergebnisse und -verfahren werden die Grenzwerte für die Nautische Sohle und somit für die Unterhaltungsbaggerungen in der Ems festgelegt.

Das Ingenieurbüro Dr. Greiser und Partner untersucht im Auftrag der BAW den Einfluss unterschiedlicher Biomassenanteile auf die Viskosität im Schlick aus den Vorhäfen der Schleuse Brunsbüttel. Mit den Untersuchungen soll beantwortet werden, wie sich die Biomassenänderungen auf die Viskosität, Dichte und Scherfestigkeit von Schlick auswirken und wie groß die jahreszeitbezogenen Änderungen dieser Parameter sind. Daraus wird dann abzuleiten sein, ob der biologische Einfluss auf die Viskosität von Schlick als „wesentlich“ oder als „vernachlässigbar“ für das Revier Brunsbüttel und für andere Schlickreviere einzustufen ist.

Literaturverzeichnis

Rechlin, D.: Bestimmung der nautischen Tiefe in Hauptschlickgebieten, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 133. Jahrgang, 1996 Nr. 7

PIANC: APPROACH CHANNELS – A Guide for Design – Final Report of the Joint-PIANC-IAPH Working Group II-30 in cooperation with IMPA and IALA (1997)

Dasch, W.: Die NAUTISONDE ein neuer Viskositäts-sensor, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 135. Jahrgang, 1998 Nr. 9

Eißfeldt, Fritz P.; Pietsch, M.: Geotechnische und rheologische Untersuchungen zur Nautischen Sohle im Revier der Außenweser, HANSA-Schiffahrt-Schiffbau-Hafen, 138. Jahrgang, 2001 Nr. 6

Eißfeldt, Fritz P.: Nautische Sohle im Blexer Bogen, Geotechnische und rheologische Vergleichsuntersuchungen, BAW 99513773, Febr. 2000, unveröffentlicht

Pietsch, M.: Festigkeitsuntersuchungen am Schlick - Vergleich der Messungen mit der Nautisonde und der undrännierten Scherfestigkeit ermittelt mit der Laborflügelsonde, Laborbericht 017, Nov. 2000, unveröffentlicht

Liebetruth, F.: Moderortrinne - Stellungnahme zu den Untersuchungen zur Nautischen Sohle, BAW 99513777, März 2000, unveröffentlicht

Liebetruth, F.: Vorhäfen Schleuse Brunsbüttel - Stellungnahme zu den Untersuchungen zur Nautischen Sohle, BAW 99513773, Nov. 2001, unveröffentlicht

Uliczka, K.; Maushake, Ch.: 1. Teilgutachten zur Ermittlung der Nautischen Sohle in der Moderortrinne, Fahrversuche zur Schiffsdynamik, BAW 0050210007, Juli 2001, unveröffentlicht

Liebetruth, F.: 2. Teilgutachten zur Ermittlung der Nautischen Sohle in der Moderortrinne - Geotechnische Stellungnahme zu den Fahrversuchen am 5. und 6. September 2000, BAW 99513777, März 2002, veröffentlicht

Liebetruth, F.: Ermittlung der Nautischen Sohle im Schlick Blexer Bogen, BAW 99513773, Mai 2002, veröffentlicht

Dynamisches Fahrverhalten extrem großer Containerschiffe unter Flachwasserbedingungen

DR.-ING. KLEMENS ULICZKA / DIPL.-ING. (FH) BERNHARD KONZIELLA, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME I

Der weltweit kontinuierliche Zuwachs der Containerumschlagszahlen in den großen Häfen führte im letzten Jahrzehnt zu einer rasanten Schiffsgrößen-Entwicklung, sodass derzeit Schiffseinheiten mit einer maximalen Containerkapazität bis zu 8.000 TEU verkehren und Häfen wie z. B. Hamburg und Bremerhaven anlaufen. Im Hamburger Hafen werden u. a. Containerschiffe der Größe der CMS HAMBURG EXPRESS (7.506 TEU) von der Reederei HAPAG-LLOYD mit einer Länge $l = 320,4$ m und einer Breite von $b = 42,8$ m ($t_{\text{MAX}} = 14,5$ m) abgefertigt. Von Dezember 2002 bis Mai 2003 wurden indessen 22 Aufträge für Containerschiffe mit Kapazitäten > 8.000 TEU allein von deutschen Reedereien und Emissionshäusern meist bei Koreanischen Werften bestellt (DOBERT, 2003). Die Fachzeitschrift HANSA veröffentlichte in ihrer Ausgabe 8/2003 die Hauptdaten der bisher größten gebauten Containerschiffe, darunter mit Baujahr 2003 ein koreanisches Projekt mit einer Kapazität von 12.500 TEU bei einer Länge von $l < 390$ m, einer Breite $b = 54,2$ m bei einem Tiefgang von $t = 14,5$ m. Letztere Angaben werden durch Aussagen der Münchner CONTI-Gruppe - Nr. 4 unter den weltweit größten Containerschiffseignern - bestätigt, deren Geschäftsführer forderte, dass die nächste Generation der Containerriesen 10.000 bis 12.000 Stellplätze haben muss (HAMBURGER ABENDBLATT, 26. Aug. 2003). Sollen derart große Containerschiffe auf den Seeschiffahrtsstraßen verkehren, sind für die Ermittlung der erforderlichen Fahrrinntiefe die bisher verwendeten Berechnungsansätze für Squat und Trimm bei Revierfahrt (extreme Flachwasserbedingungen) zu verifizieren.

In der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) werden Grundsatzuntersuchungen für Ausbauplanungen und die wirtschaftliche Nutzung der vorhandenen Wassertiefen unter Berücksichtigung der nautischen Sicherheit durchgeführt. Zur Beurteilung der nautischen Sicherheit ist es erforderlich, das dynamische Fahrverhalten der sehr großen Containerschiffe auch unter Grenzbedingungen, d. h. unter extremen Flachwasserbedingungen bis hin zum Aufsetzen, sicher beurteilen zu können. Derartige Untersuchungen sind nach Stand von Technik und Wissenschaft bisher nur in hydraulischen Modellversuchen möglich.

Die Grundlagenuntersuchungen zur Schiffsdynamik sehr großer Containerschiffe im extremen Flachwasser wurden vom Forschungskordinator Küste LBDir Dr.-Ing. Flügge initiiert und fachlich begleitet.

Grundlagen

Der Fachbegriff „Dynamisches Fahrverhalten“ wird im Folgenden reduziert auf die vertikalen Bewegungen des Schiffs wie Squat und Trimm in Wechselwirkung mit der Schiffsgröße, der Schiffsgeschwindigkeit und den Fahrwasserbedingungen. Bei der Fahrt eines Schiffs durch das Wasser treten infolge der verursachten Verdrängungsströmung (BERNOULLI-Strömung) und der auftretenden Druck- und Wasserspiegeländerungen an Bug, Schiffslängsseite und Heck langperiodische Primär- und kurzperiodische Sekundär-Wellensysteme auf. Der **Squat S** ist die Absenkung des fahrenden Schiffes mit dem Primär-Wellen-System und der **Trimmwinkel Θ** die Verdrehung des Schiffes um die Querachse. **Seitlich unbegrenztes Flachwasser** wurde angelehnt an ICORELS (1997) definiert: Die Wassertiefe h ist deutlich geringer als der 2fache Schiffstiefgang t , die hydraulisch wirksame Breite w des Fahrwasserquerschnitts ist größer als das 10fache der Schiffsbreite b . **Seitlich begrenztes Flachwasser** wird bei mittiger Fahrt über das Querschnittsverhältnis n ($n = A / A_S$) und bei außermittiger Fahrt über das Teilquerschnittsverhältnis n_T beschrieben. Bei den folgenden Auftragungen werden Squat und Trimm nicht besonders getrennt, sondern als **Bug-„Squat“** und **Heck-„Squat“** aufgetragen. Für eine Fahrrinnenbemessung ist die Bestimmung des tiefsten Punktes eines fahrenden Schiffes ausschlaggebend.

Untersuchungskonzept

Ziel der Untersuchungen ist es, der Wasser- und Schiffahrtsverwaltung (WSV) für konkrete Ausbauplanungen und für die wirtschaftliche Nutzung der Seeschiffahrtsstraßen (Tidefahrpläne) die geschwindigkeits-, wasserstands- und tiefgangsabhängigen Parameter **Squat und Trimm** zur Festlegung der Fahrrinntiefen zur Verfügung zu stellen. Das Untersuchungskonzept setzt sich aus drei Teilprojekten zusammen:

- I. Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt über eine feste, ebene Sohle in seitlich unbegrenztem Flachwasser (Einfluss des Flachwassereffekts; ULICZKA / FLÜGGE, 2001)
- II. Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt über eine feste Sohle mit Transportkörpern in seitlich unbegrenztem Flachwasser (FLÜGGE / ULICZKA, 2001, 2001b)

Bezeichnung	Länge	Breite	Tiefgang	UKC _R *	c _B -Wert**	SG ⁺	KG ⁺⁺
-	m	m	m	m	-	-	m
JUMBO	320	40	14,5	2	0,740	6,29	11,8
MEGA-JUMBO	360	55	16,0	1-1,5 - 2	0,677	6,10	10,2

* UKC_R : Under-Keel-Clearance in Ruhe ** c_B : Blockkoeffizient + SG : Schlankheitsgrad

++ KG: Gewichtsschwerpunkt über Kiel

Tabelle 1: Schiffsdynamische Parameter der untersuchten Schiffe

III. Erfassung von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Druck- und Wellensysteme bei Fahrt im Revier mit seitlich begrenztem extremen Flachwasser.

Die Systemuntersuchungen liefern Fahrkurven für große Containerschiffe mit genauen Squat- und Trimmwerten, die auf Grund der untersuchten Grenzbedingungen (Maximalabmessungen) auf der sicheren Seite liegen. In dieser Veröffentlichung werden einzelne Beispiele der Teilprojekte II und III vorgestellt.

Untersuchungsmethode hydraulischer Modellversuch

Auf die Wahl der Untersuchungsmethode wurde in früheren Veröffentlichungen vertieft eingegangen (u. a. FLÜGGE / ULICZKA, 2001), sodass hier nur nochmals zusammenfassend festgestellt wird, dass **analytische und empirische Ansätze** zur Berechnung des Squats jeweils nur zur Abschätzung des Squats unter den angegebenen Grenzbedingungen, für die sie ermittelt wurden, verwendet werden sollten. **Naturmessungen** sind für **systematische Untersuchungen** von Squat und Trimm sowie schiffserzeugter Belastungen **unwirtschaftlich**. Zur **zusätzlichen Absicherung** von Modellversuchen sind Messungen einzelner Passagen großer Containerschiffe bei Revierfahrt **sinnvoll**, doch sind Extremzustände mit geringer Kieffreiheit (UKC) selten zu erreichen. Die auch von der BAW unterstützte Entwicklung **hydrodynamisch-numerischer Modellverfahren** im Grenzbereich zwischen Schiffbau und Wasserbau verspricht in absehbarer Zeit die Möglichkeit, Fragestellungen zur Schiffsdynamik in extremen Flachwasser auch bei den besonderen Bedingungen der Revierfahrt mittels dieser Methode zu bearbeiten (ULICZKA, 2002). Systematische Untersuchungen zur gesicherten, quantitativen Prognose des geschwindigkeits- und tiefgangsabhängigen Squats im extremen Flachwasser bis hin zur Grundberührung sind derzeit nur bei exakt steuerbaren Randbedingungen möglich, wie sie die Methode des **hydraulischen Modellversuchs in fachlich abgesicherten Modellmaßstäben** bietet.

Die Untersuchungen der BAW wurden in einem Flachwasserbecken mit der Länge von 100 m und der Breite von 35 m (max. Wassertiefe 0,7 m) vorgenommen. Der gewählte Modellmaßstab betrug 1:40. Die schiffsdynamischen Parameter des untersuchten großen PPM-Containerschiffs (**JUMBO**) und des extrem großen PPM-Containerschiffs der Zukunft (**MEGA-JUMBO**) sind in Tabelle 1 aufgeführt:

Die Modellschiffe führen als funkferngeschaltete, seilgeführte Selbstfahrer mit eigenem Propellerantrieb. Schiffsgeschwindigkeit, Squat und Trimm wurden u. a. lokal nach einem laser-geometrischen Verfahren registriert, zusätzlich wurde die Schiffsdynamik auf der gesamten Beckenlänge mittels eines Laser-Zielplatten-Systems erfasst (FLÜGGE / ULICZKA, 2001).

Die im hydraulischen Modell untersuchten **Sohlstrukturen** sind aus der Analyse von Fahrwasserpeilungen abgeleitet und wurden zur Eingrenzung der verschiedensten Formen, Längen und Höhen von Transportkörpern (TK) in der Natur zu TK-Längen von $\lambda_{TK} = 50$ m, 75 m und 100 m bei gleicher Höhe von $H = 4$ m gewählt. Die strukturierte Sohlbreite entsprach dem 4fachen der Schiffsbreite des MEGA-JUMBO-Containerschiffs. Das **seitlich begrenzte** Flachwasser wurde durch den Einsatz flexibler Böschungen auf Wasserstraßenquerschnitte von $n = 26$ bis zu $n = 10$ modelliert (Parameter für den MEGA-JUMBO). Die für hydraulische Modellversuche notwendigen Ähnlichkeitsbedingungen waren durch die Wahl des Modellmaßstabes 1:40 ($l_{MODELL} = 8$ m bzw. 9 m; $0,6$ m/s $< v_{S,MODELL} < 1,4$ m/s) sowie der Einhaltung des FROUDEschen Gesetzes und der REYNOLDSschen Randbedingungen (Faktor > 10 über Re_{krit}) voll erfüllt. Die Prognosefähigkeit der Versuche war somit gegeben.

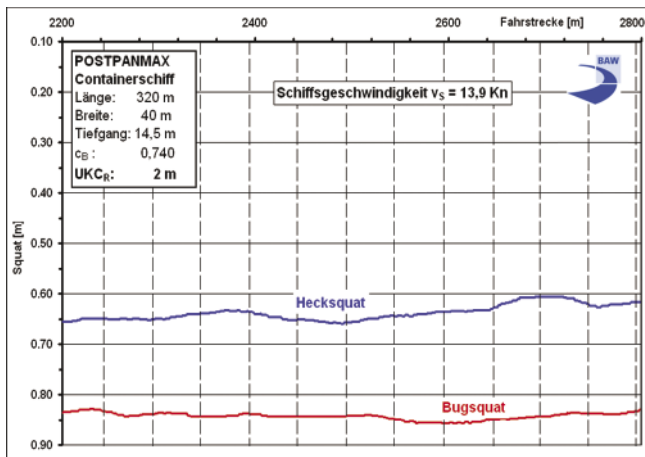


Bild 1a

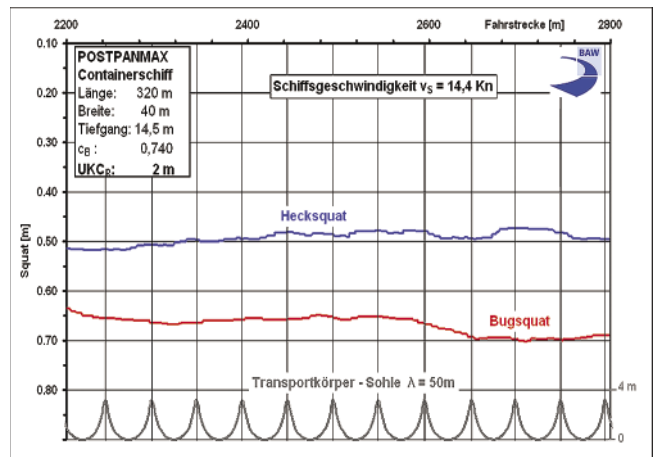


Bild 1b

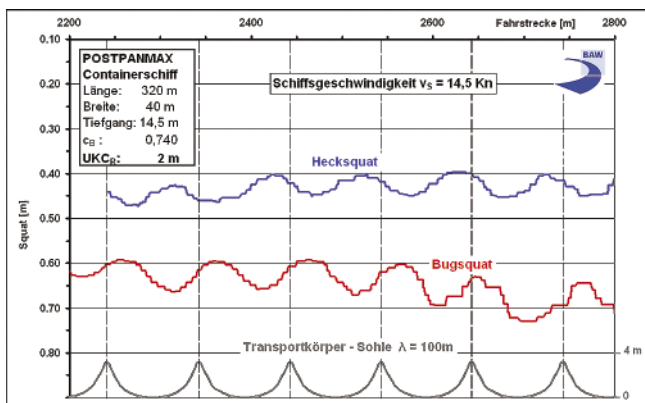


Bild 1c

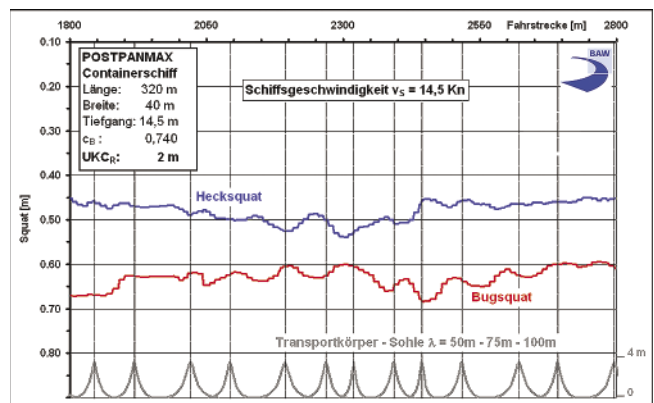


Bild 1d

Bild 1: Fahrtdynamisches Verhalten des JUMBO bei Fahrt über verschiedene Sohlformen
 Bild 1a: ebene Sohle; Bild 1b: $\lambda = 50$ m; Bild 1c: $\lambda = 100$ m; Bild 1d: $\lambda = 50 - 75 - 100$ m
 bei einer $UKC_R = 2$ m und rund $v_s \approx 14$ Kn in seitlich unbegrenztem Flachwasser

Ausgewählte Ergebnisse Fahrt über Transportkörperstrecken

Das fahrdynamische Verhalten eines extrem großen Containerschiffs bei Fahrt über verschiedene Sohlformen bei seitlich unbegrenztem Flachwasser ist in Bild 1 zusammengestellt. Die vier Grafiken in Bild 1 zeigen die kontinuierliche Aufzeichnung der vertikalen Bewegung von Bug und Heck eines JUMBO bei Fahrt über eine ebene Sohle sowie bei Fahrt über Transportkörper der Länge von $\lambda = 50$ m, $\lambda = 100$ m und gemischter Sohlstruktur mit $\lambda = 50 - 75 - 100$ m. Ein Vergleich der Grafiken veranschaulicht die Zunahme des dynamischen Verhaltens in Abhängigkeit der Transportkörperlänge. Bei der Fahrt über die Transportkörperstrecke mit $\lambda = 50$ m zeigte das Schiff im Verhältnis zur ebenen Sohle ein nur leicht unruhigeres Fahrverhalten (Grafiken a und b).

Mit $\lambda = 100$ m war ein Verhältnis von TK-Länge λ zu Schiffslänge l von etwa $\lambda = l/3$ gewählt, sodass ein Stampfen des großen PPM-Containerschiffs mit der

Periode der Transportkörper angeregt wurde (Grafik c). Der Grund liegt in einem lokal höheren Bugsquat bei geringerer UKC über dem TK-Berg und gleichzeitigem geringeren Hecksquat bei lokal größerer Wassertiefe im TK-Tal. Die Amplituden erreichten in Abhängigkeit der Schiffsgeschwindigkeit im Maximum Werte bis zu $\Delta S = 0,16$ m ($v_s = 15,3$ Kn). Die systematischen Untersuchungen mit TK-Feldern jeweils gleicher TK-Länge wurden ergänzt durch Fahrten über eine TK-Sohle mit unregelmäßigen Längen von $\lambda = 50$ m - 75 m - 100 m (ca. 5 Schiffslängen, 25 TK). Ein leichtes Stampfen des JUMBO infolge der unregelmäßigen TK-Abfolge wurde in einer Größenordnung von etwa $\Delta S = 0,07$ m ($v_s = 16,8$ Kn) registriert. Der Absolutwert des Squats wurde über einer unregelmäßigen TK-Strecke gleichermaßen reduziert wie bei den Versuchen mit konstanter TK-Länge (MEGA-JUMBO; Bild 2). Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Abnahme des Squats bei der Fahrt über eine TK-Strecke, was sich besonders klar bei einer Kieflfreiheit von $UKC_R = 2$ m mit einer Größenordnung bis zu $\Delta S = 0,3$ m ($v_s \approx 13$ Kn) ergab.

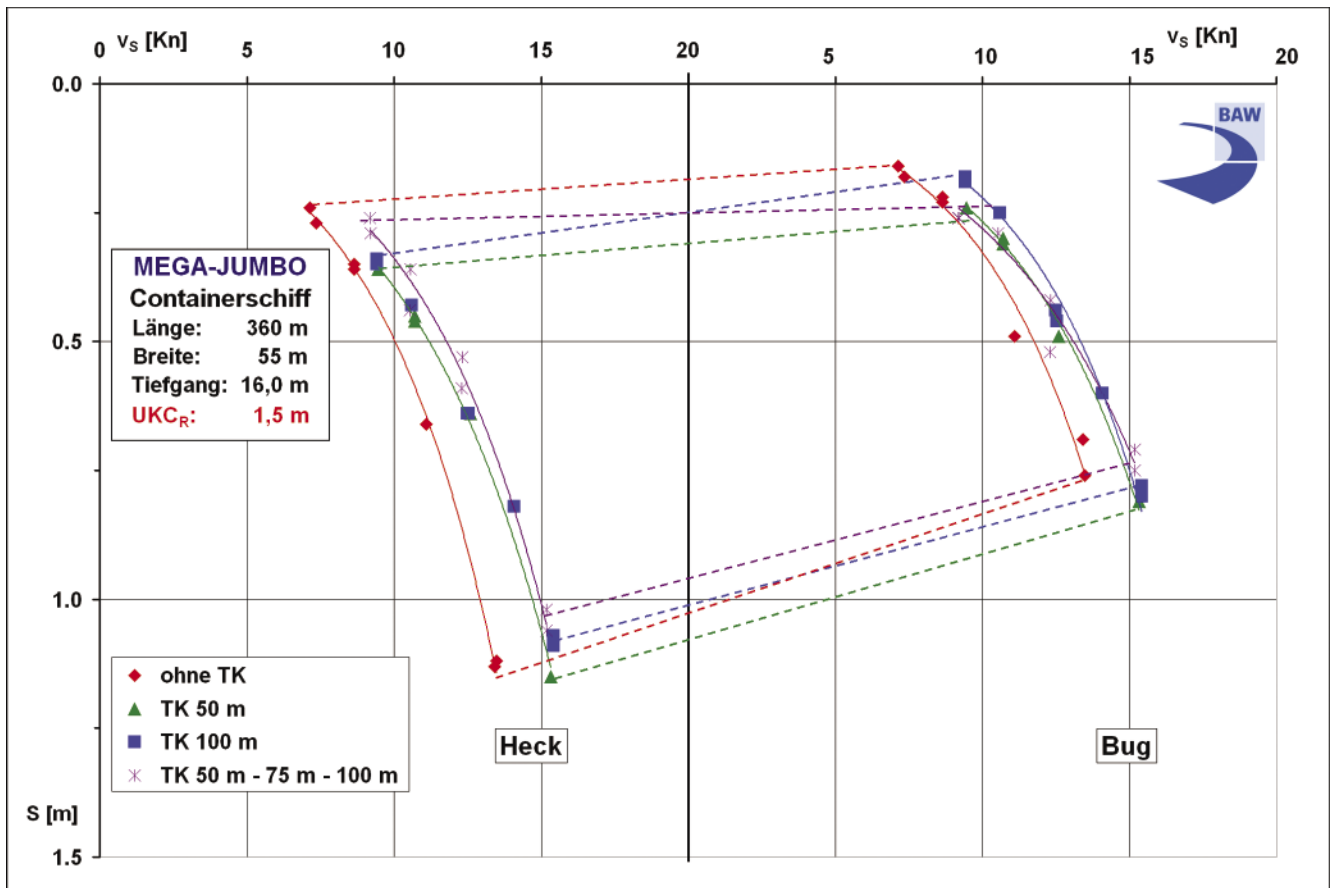


Bild 2: Einfluss der Sohlformen auf Squat und Trimm großer PPM-Containerschiffe (MEGA-JUMBO bei UKC_R = 1,5 m; seitlich unbegrenztes Fahrwasser)

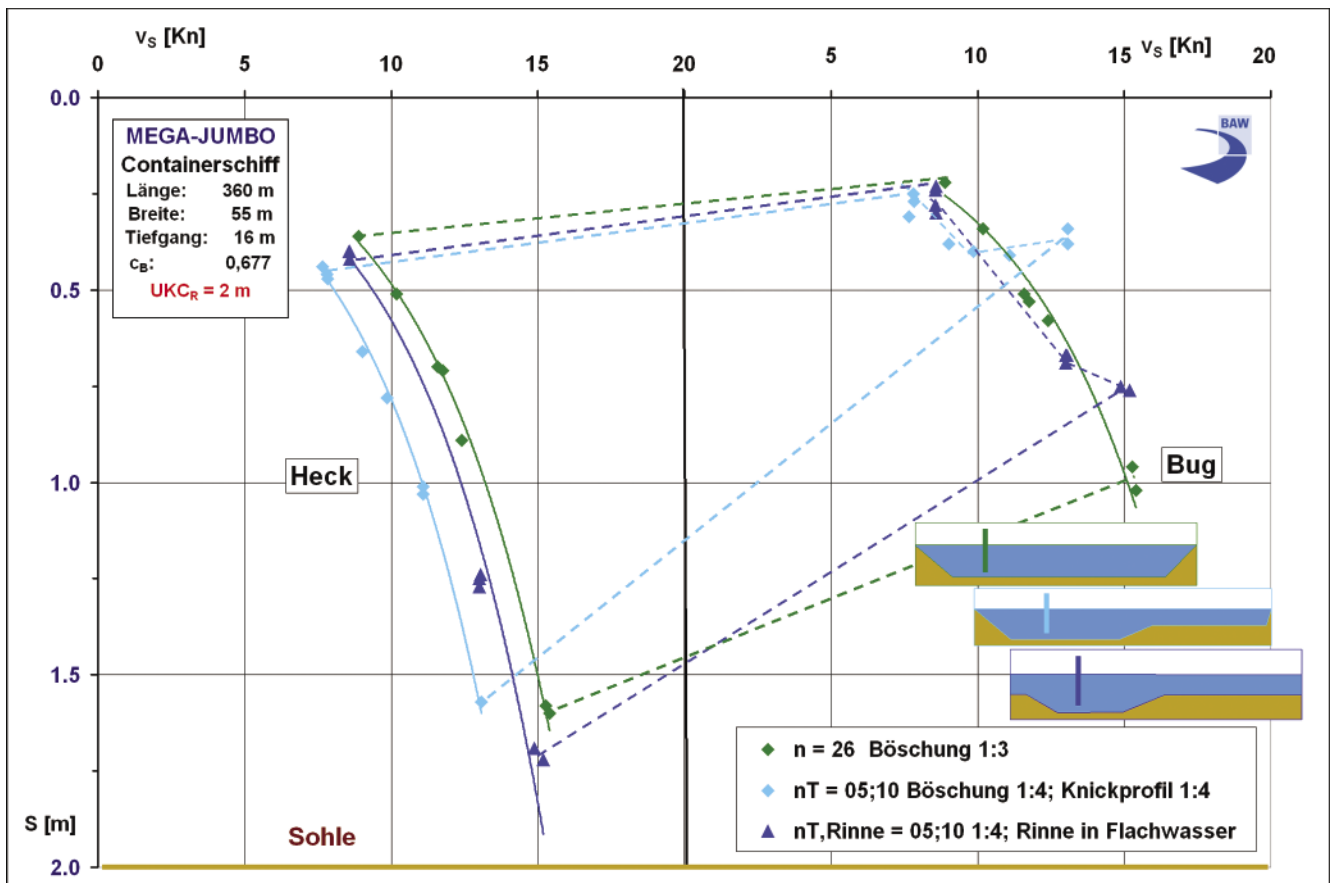


Bild 3: Squat und Trimm des MEGA-JUMBO in Abhängigkeit des Querschnittsverhältnisses, der Querprofilform und der Schiffsgeschwindigkeit

Fahrt in seitlich begrenztem Flachwasser

Aus der Vielfalt der Untersuchungsserien (u. a. Trapezprofil mittige / außermittige Fahrt; Trapez / Knickprofil; Rinne im Flachwasser) des Teilprojekts III werden in Bild 3 die Ergebnisse für die Passagen des MEGA-JUMBO

- 1.) bei außermittiger Fahrten durch ein breites Trapezprofil ($n = 26$; grün),
- 2.) bei Fahrt durch ein sehr enges Querprofil mit Teilquerschnittsverhältnissen von $n_T = 5 / 10$ ($n \approx 7$; hellblau) und
- 3.) bei Fahrt durch eine Rinne im Flachwasser ($n_{T,RINNE} \approx 5 / 10$; dunkelblau) vorgestellt.

Die jeweilige hydraulisch wirksame Querprofilbreite bestimmt zum einen deutlich den maximalen Squat des MEGA-JUMBO. Die Differenz von 1.) zu 2.) beträgt bei etwa $v_s \approx 12$ Kn annähernd $\Delta S \approx 0,7$ m. Zum anderen wird am Verlauf des Bugsquats ersichtlich, dass im engsten Querprofil ab etwa $v_s \approx 10$ Kn und bei Fahrt durch die Rinne im Flachwasser bei $v_s \approx 13$ Kn der Bereich der Grenzgeschwindigkeit erreicht wird. Der Gesamtwiderstand der extrem flachen und eng begrenzten Fahrrinne bewirkt, dass sich das Schiff stark hecklastig vertrimmt und der Bug sich auf die eigene Bugwelle schiebt. Der JUMBO verändert bei gleichen Randbedingungen in Abhängigkeit der Querschnittsverhältnisse den vorlichen Trimm in engen Querschnitten ($n_T = 7 / 14$) zum annähernd ausgeglichenen Trimm.

Vergleich mit bisherigen Berechnungsansätzen

Zur Überprüfung der Gültigkeit bekannter analytischer und empirischer Berechnungsansätze zum Squat wurden die Messergebnisse der Versuchsserien zusammen mit ausgewählten Berechnungen aufgetragen (Bild 4). Anhand der beispielhaften Auftragungen für Fahrten über Transportkörperstrecken (Bild 4a) bzw. bei Fahrt durch einen engen strukturierten Querschnitt (Bild 4b) wird deutlich, dass keiner der Berechnungsansätze die unterschiedlichen Reviervhältnisse all-gemeingültig berücksichtigt.

Bewertung der bisherigen Ergebnisse

Die vorgestellten Ergebnisse der Grundsatzuntersuchungen zeigen, dass die bisher verwendeten Berechnungsformeln für extrem große Containerschiffe unter Flachwasserbedingungen nicht zutreffend sind, da u. a. Sohlstrukturen in diesen Ansätzen nicht berücksichtigt werden. Bemerkenswert sind die deutlich geringeren Squatwerte bei Fahrt über Transportkörperstrecken in seitlich unbegrenztem Flachwasser, sodass für die vorhandenen Fahrrinnen bei entsprechenden Sohlstrukturen hinreichende nautische Sicherheiten anzuneh-

men sind. Für extrem große Containerschiffe werden in engen Querschnitten Grenzbereiche mit sehr hohen Squatwerten schon bei moderater Schiffsgeschwindigkeit (z. B. $v_s \approx 13$ Kn) erreicht. Auch das unterschiedliche Trimmverhalten (JUMBO mit $b = 40$ m zu MEGA-JUMBO mit $b = 55$ m) war bisher nicht bekannt.

Sind für die Reviere der Seeschiffahrtsstraßen exakte Angaben zu Squat und Trimm (Bug- bzw. Heck-squat) erforderlich, sind die bisher eingesetzten Berechnungsansätze als nicht hinreichend zu werten. Die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen verdeutlichen die Notwendigkeit, besondere lokale Gegebenheiten, wie u. a. Sohlstruktur, bei Simulationsversuchen zur Prognose der Fahrdynamik extrem großer Containerschiffe zu berücksichtigen.

Literatur

Dobert, J.: Neue Auftrags-Superwelle rollt an, HANSA, 140. Jhrg., Nr. 6, 2003

Flügge, G.; Uliczka, K.: Dynamisches Fahrverhalten und Wechselwirkungen mit der Fahrrinnensohle von sehr großen Containerschiffen unter extremen Flachwasserbedingungen, Tagungsband HTG-Kongress Häfen & Wasserstraßen, Hamburg, 2001

Flügge, G.; Uliczka, K.: Fahrverhalten großer Containerschiffe in extrem flachem Wasser, HANSA, 138. Jhrg., Nr. 12, 2001b

ICORELS: International Commission for the Reception of Large Ships, ICORELS Expression in: Seehafenzufahrten – Ein Leitfaden zur Bemessung (Übersetzung) PIANC/IAPH AG II-30, Bulletin Nr. 95, Bonn 1997

Uliczka, K.; Flügge, G.: Squat-Untersuchungen für sehr große Postpanmax-Containerschiffe, HTG/STG-Sprechtage, BAW Hamburg, März 2001

Uliczka, K.: Verkehrswasserbau an Seeschiffahrtsstraßen, 23. Duisburger Kolloquium Schiffstechnik / Meerestechnik: Das Schiff in Wechselwirkung mit der Wasserstraße, Duisburg 2002

Conti: Taiwaner chartern Großschiffe, Hamburger Abendblatt, 26.08.2003

Wachstum bei Containerschiffen? HANSA, 140. Jhrg., Nr. 8, 2003

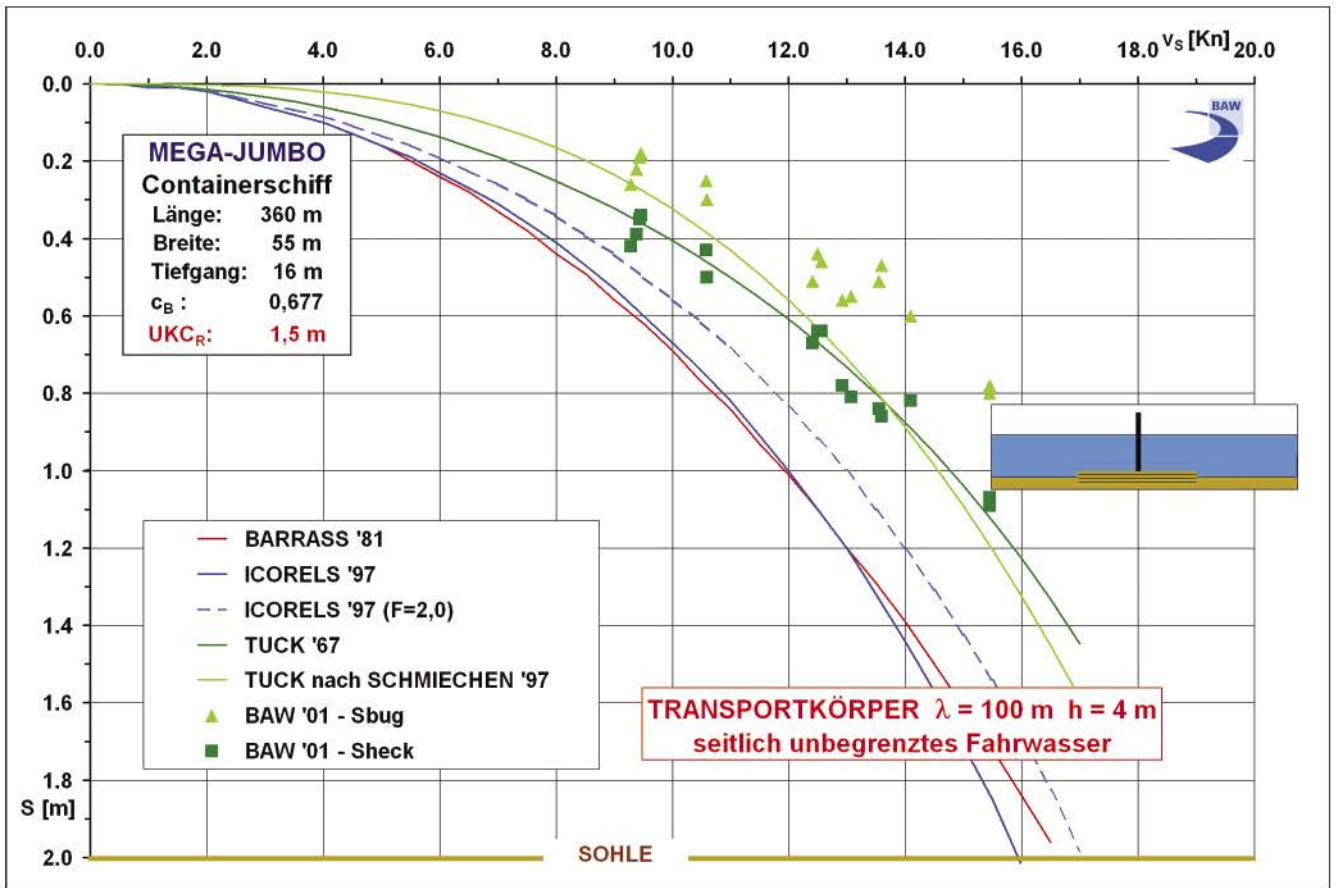


Bild 4a

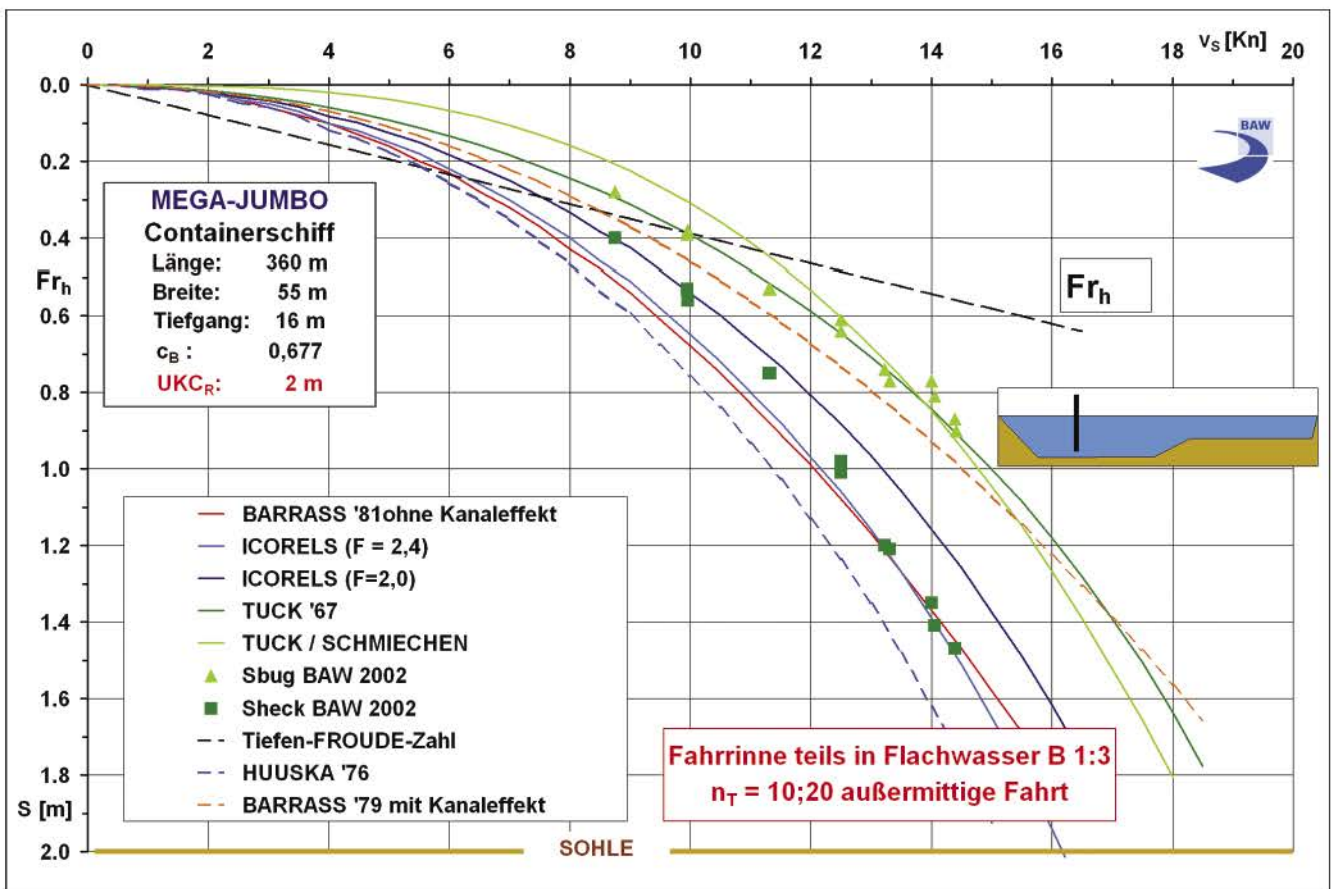


Bild 4b

Bild 4: Vergleich analytischer und empirischer Ansätze zum Squat mit Ergebnissen aus dem hydraulischen Modell (MEGA-JUMBO; Bild 4a: TK-Länge 100m; Bild 4b: seitlich begrenztes extremes Flachwasser)

Entwicklung, Planung und Neubau von Wasserfahrzeugen

DIPL.-ING. PETER BIELKE, DIPL.-ING. JÜRGEN SIEBENEICHER, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT WASSERFAHRZEUGE

1 Allgemeines

Das Referat K4 „Wasserfahrzeuge“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) ist aus der ehemaligen Zentralstelle für Schiffs- und Maschinentechnik (ZSM) hervorgegangen, die als Stabsstelle in der Vergangenheit maßgeblich an dem Wiederaufbau und der Modernisierung der Wasserfahrzeugflotte auf den Bundeswasserstraßen beteiligt war.

Vornehmliche Aufgabe des Referates ist es heute, das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) und die nachgeordneten Dienststellen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung (WSV) und das Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie (BSH) in allen Fragen der Schiffstechnik zu beraten sowie bei der Beschaffung von Schiffsneubauten fachlich zu unterstützen. Darüber hinaus wird das Referat Wasserfahrzeuge in Amtshilfe auch für andere „schiffahrtstreibende“ Bundesministerien, wie das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) – Meeres- und Polarforschung –, das Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) – Fischereischutz und Fischereiforschung – und das Bundesministerium des Innern (BMI) – Grenzschutz auf Nord- und Ostsee – tätig.

Bei der Durchführung von Beschaffungsmaßnahmen wird dem Referat neben der konzeptionellen Entwicklung, Bauaufsicht, Durchführung von Erprobungen und Abnahmen zunehmend auch die Ausschreibung und Vergabe übertragen. Für diese Aufgabenerledigung stehen erfahrene Spezialisten der Fachrichtungen Schiffstheorie, Schiffbau, Maschinenbau, Elektrotechnik und Nachrichtentechnik zur Verfügung.

Das zu bearbeitende Spektrum an Spezialschiffen reicht vom kleinen Aufsichtsfahrzeug über Peil- und Messschiffe, Eisbrecher, Seezeichenfahrzeuge, Lotsenschiffe bis hin zu Schadstoffunfall-Bekämpfungsschiffen und Forschungsschiffen.

In die Planung sind von Anfang an neben Arbeitsschutz- und Unfallverhütungsbestimmungen die gesetzlichen Schiffssicherheitsvorschriften einzubeziehen. Für Binnenschiffe sind dieses maßgeblich die Binnenschiffsuntersuchungsordnung (BinSchUO) in Verbindung mit der Rheinschiffsuntersuchungsordnung (RheinSchUO).

Für Seeschiffe sind das Schiffssicherheitsgesetz (SchSG) und die dazu ergangenen Schiffssicherheits-

verordnungen (SchSV) anzuwenden. Daneben gilt es, eine Reihe von Sondervorschriften auf Grund der besonderen Bauart der Schiffe, wie z. B. den IMO-Code über die Sicherheit von Spezialschiffen oder die Richtlinien für Hubschrauberabwindschflächen auf Seeschiffen, anzuwenden.

Der öffentliche Auftraggeber ist nicht verpflichtet, seine Schiffe zu klassifizieren oder die Bauvorschriften anerkannter Klassifikationsgesellschaften, wie z. B. die des Germanischen Lloyd, anzuwenden. Er tut dieses jedoch wohlweislich für alle seegehenden Seeschiffe und in besonderen Fällen auch für Binnenschiffe, da hierdurch ein hoher Sicherheitsstandard gewährleistet ist.

Der Ablauf einer Beschaffungsmaßnahme im Geschäftsbereich des BMVBW ist im Wesentlichen in drei Phasen untergliedert (Bild 1).



Bild 1: Phasen einer Beschaffungsmaßnahme

2 Konzeptionsphase

Die Konzeptionsphase gliedert sich in Vorplanung und Entwurfsaufstellung. Im Rahmen der **Vorplanung** wird vom zukünftigen Nutzer - z. B. einem Wasser- und Schifffahrtsamt (WSA) - ein mehr oder weniger detailliertes betrieblich-technisches Anforderungsprofil aufgestellt.

Die für den Schiffsentwurf relevanten Parameter wie Länge, Breite, Tiefgang, Schiffsgeschwindigkeit u. a. werden in einer ersten Berechnungsschleife auf ihre Kompatibilität hin untersucht, parallel hierzu werden bei Vorliegen kritischer Berechnungswerte Varianten mit entsprechenden Ausführungsarten ermittelt und aufgezeigt.

Bei Beschaffungsmaßnahmen im Rahmen des Genehmigungsverfahrens der WSV ist ein **Entwurf** als Haushalts- bzw. Ausführungsunterlage aufzustellen. Zur Er-

stellung dieses Entwurfes wird das mit dem Betreiber abgestimmte Anforderungsprofil in eine erste technische Kurzbaubeschreibung umgesetzt. Hierbei werden folgende Bereiche in der notwendigen Tiefe ausgearbeitet:

Der Bereich der **Schiffstheorie** deckt das gesamte schiffstheoretische Anforderungsprofil ab. Hierzu gehören Überlegungen zur Schiffsförmigkeit, Prognosen zur Festlegung von Geschwindigkeit und Antriebsleistung, Überprüfung der Stabilität sowie alle notwendigen hydrostatischen und hydrodynamischen Berechnungen. Um eine entsprechende Planungsreife zu gewährleisten, werden für jeden aufzustellenden Entwurf, je nach Komplexität, mehrere Schleifen mit steigender Genauigkeitsanforderung zwischen der Schiffstheorie und den einzelnen Fachbereichen durchgeführt.

Eine weitere Überprüfung der dem Konzept zu Grunde liegenden Schiffseigenschaften erfolgt zu einem späteren Zeitpunkt vor Konstruktionsbeginn mit Hilfe von Modellversuchen in einer Schiffsbauversuchsanstalt (Bild 2). Das Schiff wird in einem bestimmten Maßstab als Holz- oder Paraffin-Modell in einem Schlepp- oder Versuchstank untersucht. Die am häufigsten durchgeführten Versuche sind der Widerstands- und der Propulsionsversuch. Beim Widerstandsversuch (ohne Antrieb) wird das Modell mit gleichförmiger Geschwindigkeit durch das Wasser geschleppt. Die gemessene Zugkraft ist gleich dem Widerstand. (Widerstandsanteile sind z. B. Reibungs- (Zähigkeits), Form- und Wellenwiderstand).

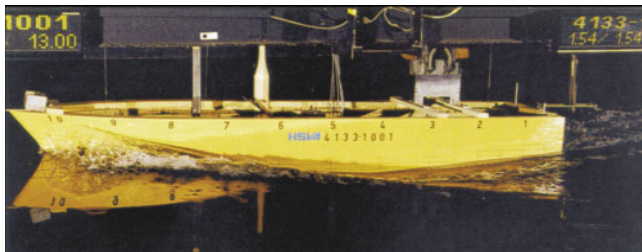


Bild 2: Schiffmodell im Versuchstank einer Schiffsbauversuchsanstalt

Beim Propulsionsversuch fährt das Modell mit eigenem Antrieb und man misst Schub und Drehmoment. Zunehmend wird heute die Schiffsförmigkeit numerisch mit Hilfe von CFD – Verfahren (Computational FLUID DYNAMICS) voroptimiert, um aufwändige Modellversuche einzusparen. Vollständig kann auf Modellversuche jedoch noch nicht verzichtet werden.

Weiter werden im Einzelfall Modellversuche zur Ermittlung des Kursstabilitätsverhaltens, der Seegangseigenschaften und der Eisbrecheigenschaften durchgeführt. Auf Grund von Ähnlichkeitsgesetzen (z. B. Froude, Reynolds) werden die Modellwerte auf die Großausführung umgerechnet.

Im Bereich des **Schiffbaus** ist insbesondere der *Schiffskörper* mit der entsprechenden Unterteilung in wasserdichte Abteilungen, den Längs- und Querverbänden (Bild 3), Zellen, Tanks, Fundamenten und Aufbauten sowie die *feste Ausrüstung* mit Anker, Winden, Hebezeuge, Treppen, Fenster, Türen etc. zu planen. Hierbei sind bereits der künftige *Schiffsausbau*, d. h. Erfordernisse hinsichtlich Raumausbau, Raumeinrichtung, Kammern, Werkstatträume etc. zu berücksichtigen.



Bild 3: Längs- und Querverbände

Die *Schiffsantriebsanlagen* mit Motoren, Wellen und Propulsionsanlagen (Bild 4) einschließlich der zugehörigen Treiböl-, Schmieröl-, Abgas und Kühlwassersysteme werden von den **Maschinenbau**-Ingenieuren geplant. In diesen Bereich fallen auch die *Schiffsbetriebsanlagen* mit allen Ver- und Entsorgungssystemen sowie den Heizungs-, Lüftungs-, Klima- und Hydraulikanlagen.

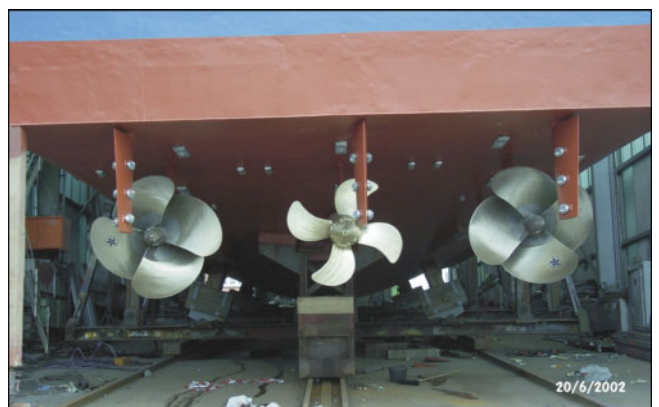


Bild 4: Propelleranlage mit Sparantrieb

Der Fachbereich **Elektrotechnik** ist zuständig für die gesamte Energieerzeugung, -verteilung und -abnahme an Bord. Hierzu gehören u. a. die Konzeption, Planung und Auslegung von Bordnetzsystemen, Generatoraggregaten, Beleuchtungsanlagen, Schaltanlagen, Verkabelung usw. sowie die Planung von Schiffsführungs- und Sicherheitsanlagen. Darüber hinaus sind

die Bordnetzanforderungen mit der entsprechenden Netzqualität festzulegen.

Der Bereich **Nachrichtentechnik** ist verantwortlich für die entsprechenden Navigatorischen Anlagen mit Kompass-, Radar-, und Navigationsanlagen.

Die vorgesehenen Meteorologischen Anlagen, Akustische Anlagen, Funkanlagen sind ebenso zu planen wie die notwendigen wasserschalltechnischen Anlagen, so z. B. Vermessungsanlagen bei Schiffen, die für die Bundeswasserstraßen und zur Seevermessung eingesetzt werden (Bild 5).

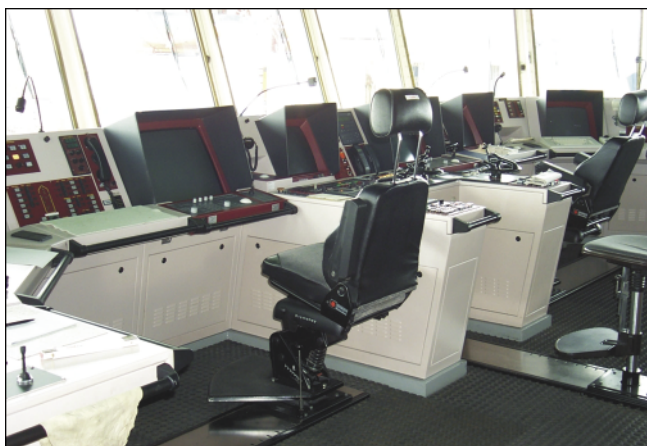


Bild 5: Brücke der NEUWERK

Mit dem Entwurf wird somit die technische Konzeption mit den erforderlichen Berechnungen als Grundlage zur Gestaltung und Ausbildung der geplanten Maßnahme geliefert. Die erforderlichen Kosten für die Beschaffungsmaßnahme werden ermittelt und mit eingereicht. Nach Genehmigung der Maßnahme folgt die Spezifikationsphase.

3 Spezifikationsphase

In der Spezifikationsphase wird die Leistungsbeschreibung, bei der Ausschreibung von Wasserfahrzeugen die Bauvorschrift (BV) mit Generalplan und allen erforderlichen Anlagen erstellt. Die Leistungsbeschreibung ist das Kernstück der Verdingungsunterlagen und für die spätere Vertragsdurchführung von fundamentaler Bedeutung. Sie bildet einerseits die Grundlage für die Angebotserstellung durch die Bieter, zum anderen ist sie das technische Vertragswerk zwischen Auftraggeber und bauausführender Werft für die spätere Bauausführung. Die Bauvorschrift dokumentiert den ausschreibungsreifen Planungs-/Entwicklungsstand und bildet ein genaues Abbild der bisherigen, gemeinsam mit den Nutzern entwickelten Konzeption. Sowohl der Betreiber mit seinen betrieblichen Anforderungen und Erfahrungen, als auch alle Fachdisziplinen finden sich hierin wieder (Bild 6).

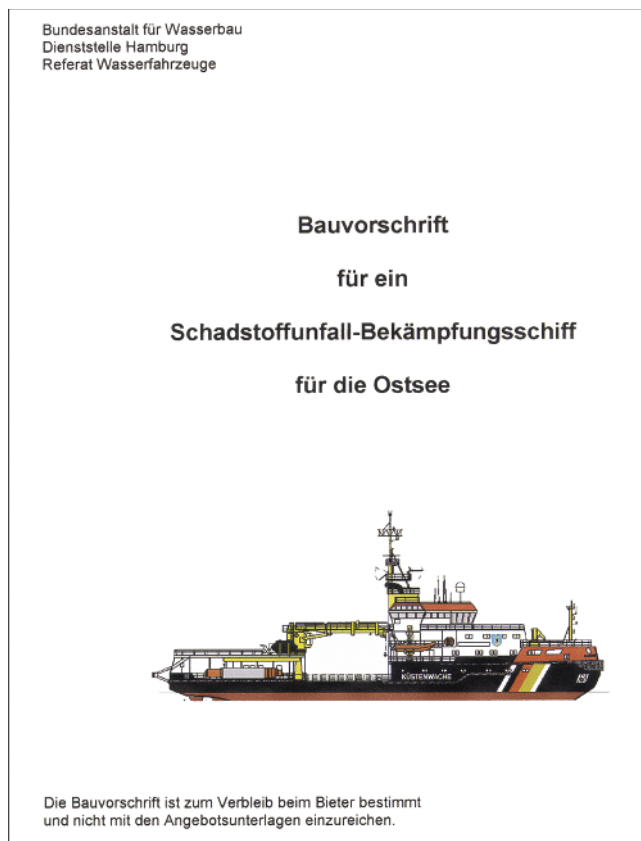


Bild 6: Bauvorschrift für das SUBS OSTSEE

Die weitgehend standardisierte Bauvorschrift gliedert sich in die in folgenden genannten Baugruppen mit den beispielhaft aufgezeigten Inhalten:

Allgemeiner Teil:

Grundforderungen, Vorschriften, Baumaterialien, Prüfungen und Erprobungen, Ablieferungsunterlagen

Schiffskörper:

Außenhaut, Doppelboden, Decks, Tanks, Verbände, Aufbauten

Feste Ausrüstung:

Türen, Fenster, Winden, Hebezeuge, Rettungseinrichtungen

Schiffsausbauten:

Raumbauplan und Einrichtung

Korrosionsschutz:

Beschichtungsmittel, kathodischer Korrosionsschutz

Schiffsantriebsanlagen:

Dieselmotoren, Antriebs- und Manövrieranlagen, Treib-, Kühlwasser- und Abgasanlagen u. a.

Elektrotechnik:

Bordnetze, elektr. Antriebe, elektr. Energieversorgungsanlagen, Schiffsführungsanlagen, Schaltanlagen, Beleuchtung u. a.

Nachrichtentechnik:

Navigationsanlagen, akustische Anlagen, Funkanlagen, einsatzspezifische Anlagen (z. B. wasser-

schalltechnische Anlagen) u. a. Inventar und Reserveteile

Sie kann bei größeren Neubauten einen Umfang von mehreren Hundert Seiten annehmen. Das auszuschreibende Wasserfahrzeug wird in der Bauvorschrift in einer gegenüber den Genehmigungsentwürfen in der Tiefe wesentlich gesteigerten Genauigkeitsanforderung spezifiziert.

Nach Erstellung aller Vergabeunterlagen einschließlich der Bauvorschrift erfolgt die Durchführung der Ausschreibung und die Vergabe durch den Auftraggeber. Die Grundlage der Ausschreibung von Wasserfahrzeugen bildet die Verdingungsordnung für Leistungen, VOL/A. Alle Schiffsneubauten überschreiten ausnahmslos den EG-Schwellenwert von 130.000 €. Sie werden daher nach den Bestimmungen der EG-Lieferkoordinierungsrichtlinie im sog. „Offenen Verfahren“ EU-weit ausgeschrieben.

4 Bauabwicklung

Mit der Auftragserteilung bzw. mit Abschluss des förmlichen Bauvertrages beginnt die eigentliche Bauabwicklung. In dieser Phase erfolgt die Baubegleitung und –aufsicht auf der Bauwerft (Bild 7).



Bild 7: Bau der NEUWERK auf der Volkswerft Stralsund

Detailausführungen als Grundlage für die von der Werft bzw. von Zulieferern zu erstellenden Koordinierungsplänen, Ausführungszeichnungen, Schemata, Farbenpläne, bis hin zu Stücklisten und Werkstattzeichnungen sind gemeinsam zu definieren und festzulegen. Im Rahmen der Bauüberwachung werden Ausführungsunterlagen, Zeichnungen und Spezifikationen, wie z. B. Generalpläne, Spantenriss, Stahlstrukturpläne etc., geprüft und zur Ausführung freigegeben.

Die technische Bauaufsicht wird federführend durch das Referat K4 unter Beteiligung der zukünftigen Nutzer wahrgenommen (Bild 8).



Bild 8: Baubesprechung NEUWERK – Einbau Sonaranlage

Notwendige Änderungen während der Bauphase werden auf Wirtschaftlichkeit sowie die schiffbaulichen Auswirkungen im Hinblick auf das Gesamtkonzept überprüft. Bereits während des Baus beginnen Prüfungen, Erprobungen und Teilabnahmen in in sich abgeschlossenen Fertigungsbereichen. So werden z. B. bei Zulieferungen Prüfstandläufe und Prüffeldabnahmen nach einem sorgfältig aufgestellten und mit der Bauaufsicht abgestimmten Programm im Herstellerwerk durchgeführt.

Die Erprobung ganzer Systeme erfolgt nach der Bordinstallation. Z. B. wird der Antriebsstrang bestehend aus Dieselmotoren, Getriebe, Wellenleitung, Kupplung und Propeller nach dem zu Wasser lassen mit einer sog. Standprobe an der Werftpier erprobt.

Das Gesamtsystem Schiff wird abschließend durch eine umfangreiche Probefahrt bzw. bei Seeschiffen durch eine Seerprobung auf Einhaltung der gemäß Vertrag zugesicherten Eigenschaften überprüft. Hierzu werden Messfahrten zum Nachweis der maximalen Geschwindigkeit, der Manöviereigenschaften, der Kursstabilität, des Seeverhaltens, der Eisbrechleistung u. a. durchgeführt. Maschinen und Geräte werden einem Dauerlastbetrieb unterzogen, Sicherheits-, Arbeits-, Mess- und Forschungseinrichtungen werden unter realen Bedingungen funktionserprobt.

Die Seerprobungen können sich im Einzelfall über mehrere Wochen erstrecken (Bild 9).

Erst wenn festgestellt ist, dass der Neubau entsprechend seinem Einsatzzweck gebaut und frei von sonstigen beeinträchtigenden Mängeln ist, kann die förmliche Abnahme ausgesprochen werden.

Und last but not least gehört zu jeder Indienststellung die traditionelle zünftige Schiffstaufe (Bild 10).



Bild 9: Erprobung des Skimmersystems NEUWERK



Bild 10: Letzte Erläuterungen vor dem Taufakt NEUWERK

Mit der Überwachung der Mängelbeseitigung (Restmängel) sowie dem Ablauf der Gewährleistungsfrist endet die Neubau- und Beschaffungsmaßnahme.

Die mathematische Modellierung als unverzichtbare Beratungsgrundlage

Zur Bedeutung mathematischer Modelle im Küstenwasserbau

DR.-ING. HARRO HEYER, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, LEITER DER DIENSTSTELLE HAMBURG

Die Methoden und Verfahren, die zur Beurteilung wasserbaulicher Fragestellungen an den Seeschiffahrtsstraßen eingesetzt werden, haben sich im Zuge der Informatisierung aller Untersuchungsmethoden verändert. Numerische Modellverfahren, die noch in den 80er-Jahren im Rahmen von Forschungsprogrammen entwickelt wurden, sind in den 90ern zur Anwendungsreife gelangt. Die BAW hat mit dieser Entwicklung zeitnah mitgehalten. Bereits Ende der 80er-Jahre wurden Verfahren für numerische Küstenmodelle von Universitäten übernommen und weiterentwickelt. Aus den Aufgaben und Fragestellungen der Wasser- und Schifffahrtsverwaltung ergaben sich wachsende Anforderungen, denen die Verfahren im Rahmen sich anschließender Kooperationen mit nationalen und internationalen Instituten mit einem umfangreichen Anteil von Eigenleistungen angepasst wurden. Durch Beteiligung der BAW an den Umweltverträglichkeitsuntersuchungen und Planfeststellungsverfahren, welche für die großen Aus- und Neubauprojekte an den Seeschiffahrtsstraßen durchzuführen waren, haben Einvernehmensbehörden und auch Einwander weitere Anforderungen formuliert.

Wasserbauliche Maßnahmen an den Seeschiffahrtsstraßen, wie der Ausbau von Fahrrinnen für tiefergehende, breitere und auch längere Schiffe, das Errichten von Sturmflutsperrwerken, der Strombau zur Steuerung der Strömungen und Transporte von Feststoffen sowie der Baggerei und Baggertgutunterbringung zur Sicherung des Schiffsverkehrs, greifen in das Naturgeschehen ein (siehe Bild 1). Diese Maßnahmen müssen fachwissenschaftlich untersucht und in ihren Wirkungen quantifiziert und bewertet werden. Da die Bewertung auf der Grundlage unterschiedlicher Betroffenheiten und Sichten zunehmend auch im öffentlichen und politischen Bereich erfolgte, wurden die an die mathematischen Modelle gestellten Anforderungen zwangsläufig Schritt für Schritt verstärkt.

Gerade die deutsche Küste ist geprägt durch weit ins Land reichende, an die Seeschifffahrt angepasste Flachland-Ästuare. Im Bereich dieser Flachland-Ästuare ist der Verkehrswasserbau eine sehr anspruchsvolle und zugleich außerordentlich interessante Aufgabe, weil die Elemente, Prozesse und Zustände des Wasserkörpers in ständiger Wechselwirkung mit den angrenzenden Sphären zu berücksichtigen ist. Die Komplexität der Aufgabe ergibt sich vor allem aus der hohen Variabilität der physikalischen Prozesse, da sich deterministische Gezeitenanteile (geprägt durch mehrere Ungleichheiten in den Tideerscheinungen) mit stochastischen wetter- und klimageprägten Anteilen vielfältig überlagern.

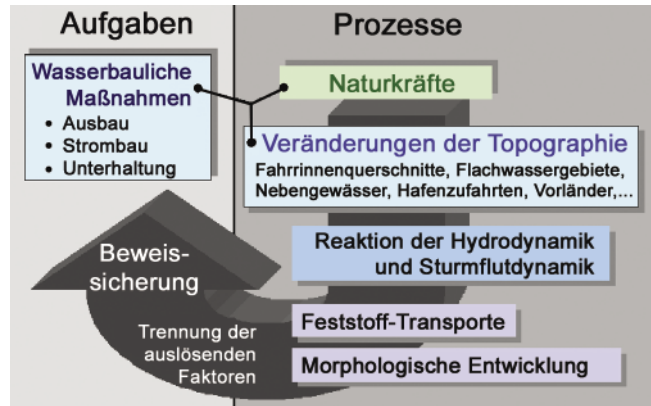


Bild 1: Aufgaben und Prozesse als Grundlage mathematischer Simulationsprojekte

Die Dynamik eines Ästuarsystems wird mit Gleichungen der Strömungs- und Bodenmechanik auf Grundlage der Naturgesetze beschrieben. Diese bilden den Grundstock der mathematischen Simulationsverfahren. Durch Anwendung eines Simulationsverfahrens auf ein bestimmtes Ästuar entsteht das Ästuarmodell, das je nach Untersuchungsziel aus mehreren Bausteinen (siehe Bild 2) zusammengesetzt wird.

Die BAW hat in den vergangenen Jahren viele mathematische Ästuarmodelle aufgebaut und betrieben. Mit steigenden Anforderungen der Fachwelt musste der Aufwand für die Berechnungen schrittweise erhöht werden. Dies ergab sich vor allem aus Verfeinerungen der Modelltopographien, räumlichen Erweiterungen der Untersuchungsgebiete und einer schrittweisen Vervollständigung der berücksichtigten physikalischen Prozesse.

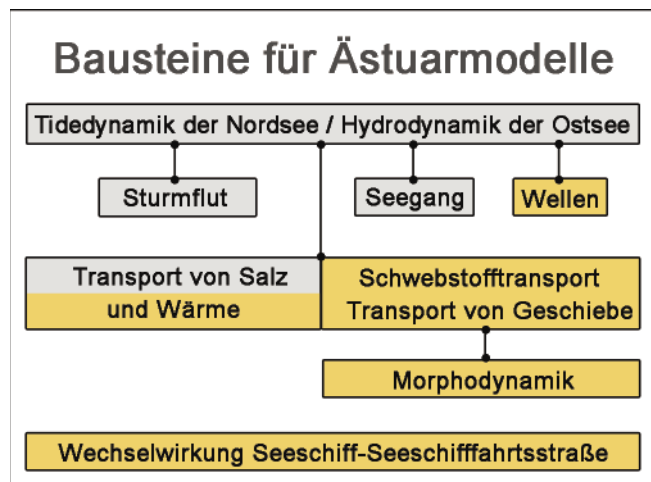


Bild 2: Bausteine zur umfassenden Simulation der Prozesse in Ästuaren

Im Rahmen zurückliegender Ausbauuntersuchungen wurde vornehmlich die Tide- bzw. Hydrodynamik einschließlich der Sturmfluten untersucht. Zur Beurteilung heute und zukünftig geplanter Maßnahmen treten Fragen zum Transport von Salz und Feststoffen sowie damit gekoppelte morphologische Entwicklungen hinzu, die vor allem auch mit 3D-Prozessen verbunden sind. Diese spielen insbesondere bei Fragen des Strombaus und der Beweissicherung eine dominierende Rolle. Zur Modellierung der einzelnen Prozesse sind somit verschiedene Modellbausteine in einer dynamischen, wählbaren Kopplung erforderlich.

Die umfassenden Ästuarmodelle erfordern leistungsfähige Rechnersysteme. Die Verfügbarkeit eines Supercomputers ist somit zwangsläufig zu einer wichtigen Voraussetzung für die Aufgabenbearbeitung in der BAW geworden. Vor jeder Beschaffung eines neuen Hochleistungs-Computersystems ist eine Bestandsaufnahme der bestehenden Ästuarmodelle und eine Analyse der mittelfristig zu erwartenden weiteren Entwicklung der fachlichen Anforderungen erforderlich. Hieraus ergeben sich die informationstechnischen Anforderungen an die Rechnerarchitektur und Leistungsfähigkeit des Systems. In der Weiterentwicklung sind aber auch die optimalen Pfade zur Wirtschaftlichkeit des Modelleinsatzes herauszufinden. Konkret sind folgende Fragen zu beantworten:

- Welche Küstenmodelle benötigt die BAW und welche Zustände sollen damit simuliert werden?
- Wie groß ist der Rechenaufwand für die Modelle und welche Datenmengen werden erzeugt?
- Welche fachlichen Anforderungen bestehen hinsichtlich der Weiterentwicklung und was folgt daraus für die Entwicklung der numerischen Verfahren sowie für den Wirkbetrieb der HN-Modelle?
- Wo liegt das wirtschaftliche Optimum für Einsatz und Entwicklung der Modelle?

Die Ästuarmodelle der BAW erstrecken sich von der landseitigen Grenze (z. B. der Tidegrenze oder dem Übergang zur Binnenwasserstraße) bis in den Mündungsbereich, wo die Fahrrinne ausreichende Tiefen in der Nord- oder Ostsee erreicht. Je nach Fragestellung kann aber auch das Seegebiet der Deutschen Bucht bzw. der Ostsee hinzugenommen werden, um auch Maßnahmen bzw. natürliche Veränderungen im Bereich der äußeren Seeschiffahrtsstraßen mit zu erfassen. Die Qualität der Lösung, die mit dem Modell erreicht werden kann, ist von der Qualität der Randwerte abhängig, mit denen dem Modell eine charakteristische Dynamik im Zuge der Simulation aufgeprägt wird. Die zeitabhängigen Randwerte für Wasserstand, Salzgehalt, Schwebstoff und Oberwasserzufluss werden daher auch als Steuerkurven bezeichnet. Weitere sehr wichtige Qualitätsmerkmale ergeben sich aus der Genauigkeit der Modell-Topographie die durch die Qualität der Vermessung und Feinheit des Gitternetzes

(Modellauflösungsvermögen) bestimmt ist. Mit zunehmendem Modellauflösungsvermögen steigt die Anzahl der Gitterpunkte. Auf der Grundlage von quadratischen Gitternetzen hat die BAW bereits 3D-Modelle mit mehr als 25 Mio. Gitterzellen aufgebaut. Große Lösungsgebiete erzwingen daher den Einsatz unstrukturierter Gitternetze mit variabler Netztopologie, mit denen die Strombauwerke und Nebenflüsse in der erforderlichen Feinheit aufgelöst werden können.

Die Modelleigenschaften bestimmen den erforderlichen Rechenaufwand im Zusammenhang mit den fachlichen Fragestellungen. Man betrachte einmal die Anzahl der Zustandsgrößen, die an jedem Gitterpunkt eines Modells berechnet werden: Wenn alle physikalischen Größen berücksichtigt werden sollen, kann heute z. B. ein 2D-Modell 21 Zustandsgrößen pro Gitterpunkt berechnen und auf den Massenspeicher des Rechners schreiben. Bei einem 3D-Modell der Jade, Weser oder Elbe werden in den tiefen Gebieten je Gitterpunkt mindestens 120 Zustandsgrößen berechnet, wenn die Strömungen in horizontalen Schichten von 1 m Mächtigkeit erfasst werden. Bei einer Wassertiefe von 10 m sind es mindestens 40 Zustandsgrößen, die bei 1 m Schichten berechnet werden.

Bisherige Schwerpunkte der Untersuchungen an der Ems waren Sturmfluten, Tidedynamik, Stauffallmodellierung für das Emssperrwerk, Strombau und Sedimenttransport. Der Sedimenttransport ist zukünftig auch für die Optimierung von Klappstellen vor allem auch in der Zusammenarbeit mit niederländischen Fachbehörden sehr wichtig. Dort werden Entscheidungen für Klappstellenorte mit Simulationsmodellen vorbereitet, die auch von deutscher Seite bewertet werden müssen. Für den Strombau werden alle wirtschaftlich sinnvollen und vor allem auch wirksamen Maßnahmen durch mathematische Simulation optimiert, um den Feststoffeintrag in das Ästuarsystem zu minimieren. Für diese Fragestellungen erfordert das System Ems künftig sehr umfangreiche 3D Simulationen. Derzeit betreibt die BAW sechs verschiedene Modelle für die Ems. Ein weiteres hoch auflösendes, unstrukturiertes Modell wird aktuell erstellt.

Jade und Weser sind in ihren Außenbereichen durch tide- und windbeeinflusste Verdriftungsprozesse über das Hohe-Weg Watt miteinander gekoppelt. Voneinander getrennte Einzelmodelle sind daher fachlich nicht vertretbar. Je nach Fragestellung sind aber verfeinert zu erfassende Strukturen entweder in der Jade oder in der Weser notwendig (unstrukturierte Modellverfahren). Zukünftige Aufgabenschwerpunkte sind: Beweissicherung zum letzten 14-m-Ausbau, erneute Anpassung von Außen- und Unterweser, Unterhaltungsfragen am Blexer Bogen und in der Schlickstrecke bei Nordenham, Verlegung und Unterhaltung des Jadefahrwassers, Jade-Weser-Port. Die anstehenden Fragen erfordern eine hohe dreidimensionale Modellauf-

lösung. Derzeit betreibt die BAW sieben verschiedene HN-Modelle für das Jade-Weser-System. Hinzu kommen noch zwei Seegangmodelle, die in ähnlicher Form auch für andere Ästuarmündungen und für Helgoland vorhanden sind.

Für die Elbe unterhält die BAW derzeit fünf Tide- und Sturmflutmodelle. Zukünftige Aufgabenschwerpunkte an der Elbe sind derzeit:

- Beweissicherung zum letzten 14,4-m-Ausbau,
- Analyse des Entwicklungspotenzials des Elbeästuars einschließlich Dämpfung von Tidehub und Strömung,
- Strombau zur Optimierung der Unterhaltung (einschließlich Klappstellenuntersuchung),
- erneute Fahrrinnenanpassung,
- Untersuchung der Sedimentationsverhältnisse in der Wechselwirkung mit den Prozessen im Hamburger Hafen,
- Untersuchung der morphologischen Prozesse im Mündungsgebiet der Elbe.

Alle strömungs- und transportrelevanten Fragen sind mit 3D-Prozessen verbunden, die fein aufgelöst simuliert werden müssen.

Die seeseitigen Ränder der Gesamtästuarmodelle an der Nordsee liegen mit beträchtlicher Ausdehnung (bis zu 60 km pro Modell) im Bereich der Deutschen Bucht. Hier gibt es nur wenige Pegel, mit deren Daten allein keine amplituden- und phasenrichtigen Steuerkurven für die Ränder der Ästuarmodelle gewonnen werden können. So weit draußen ist die Messung der tide- und wetterbedingten Variationen des Wasserstandes über einen Zeitraum von mehreren Wochen mit einem sehr großen Aufwand verbunden. Darüber hinaus wird ein gewählter Messzeitraum in der Regel keinen vollständig repräsentativen, charakteristischen Systemzustand erfassen. Mehrere charakteristische Systemzustände zu erfassen, ist nahezu unmöglich. Es ist daher erforderlich, die Pegeldata vergangener Perioden zu analysieren und mit Hilfe eines mathematischen Modells der Deutschen Bucht / Nordsee - an das die vollständigen Ästuarmodelle mit verringerter Auflösung der Topographie gekoppelt sind - im sogenannten „hindcast“ zu simulieren. Auf diese Weise können Steuerkurven für beliebige charakteristische Systemzustände gewonnen werden.

Das Gesamtmodell für alle Ästuar einschließlich der Deutschen Bucht / Nordsee dient zukünftig aber auch der Analyse der Sediment austauschprozesse zwischen den Ästuarmündungen, da gerade hier die größten Sedimentmengen umgelagert werden. Diese Untersuchungen sind insbesondere wichtig für den Themenkreis Beweissicherung und für alle wasserbaulichen Fragen, die mit morphologischen Folgewirkungen verbunden sind. Darüber hinaus müssen für

Sturmflutuntersuchungen (Nachweis der Hochwasserneutralität im Zuge von Ausbaumaßnahmen) zukünftig auch Wind- und Druckfelder über der Nordsee einschließlich deren Wirkung auf die Ästuarsysteme berechnet werden.

3D-Prozesse lassen sich besonders gut in Ästuaren studieren, die mehr durch das Wettergeschehen als durch periodische Tideprozesse beeinflusst sind. Derartige Systeme müssen a priori über einen längeren Zeitraum (mehrere Monate) betrachtet werden, um die Einflüsse des stochastischen Wettergeschehens auf die Systemreaktion umfassend zu bewerten. Die BAW hat für den Ausbau des Marinehafens Warnemünde ein 3D-Modell für den Seekanal Rostock, Breitling und die Unterwarnow aufgebaut. Die Reaktion dieses Systems auf die winderzeugten Eigenschwingungen der Ostsee, auf den lokalen Windschub und auf gesteuerte, zum Teil stark schwankende Oberwassermengen kann besonders gut mit den Vermischungsprozessen innerhalb der Brackwasserzone - in Form der sehr variablen Salzgehaltszonierungen / Salzgehaltschichtungen - dargestellt werden. Zur Abschätzung ausbaubedingter Wirkungen bedarf es hier einer geeigneten Statistik zur Analyse der ausbaubedingten Wirkungen.

Wenn es ausschließlich um die Analyse von Wasserständen, Strömungen und Durchflüssen im Bereich der Nordsee geht, ist im Rahmen von Voruntersuchungen zumindest ein 14-tägiger Simulationszeitraum das Minimum für eine sachgerechte Bearbeitung wasserbaulicher Fragestellungen an der Küste. Fragen zum Salz- und Sedimenttransport erfordern weit längere Zeiträume, die auf dem Rechner naturnah nachgebildet werden müssen.

In der Summe verfügt die BAW derzeit über mehr als 20 verschiedene Ästuarmodelle, die je nach fachlicher Fragestellung und Projektfortschritt eingesetzt werden. Bei der genannten Anzahl der Modelle ist noch nicht die Vielzahl der Varianten berücksichtigt, die im Rahmen der Projekte zusätzlich gebildet werden müssen.

Zur Qualitätssicherung der Modellergebnisse und der aus diesen im Rahmen von öffentlich-rechtlichen Verfahren gewonnen Prognosen spielt die Verfügbarkeit von speziellen Messergebnissen (z. B. bis an die Sohle heranreichende Strömungen über die gesamte Wassersäule, Salzgehalte, horizontale und vertikale Salzgradienten, Schwebstoffkonzentrationen und deren Zusammensetzung, Beschaffenheit und Zusammensetzung des Sohlmaterials) eine wichtige Rolle. Verfeinerte Simulationsverfahren erzwingen spezielle Messungen in der Natur, die nicht durch operationelle gewässerkundliche Messungen erbracht werden können. Ein weiterer wichtiger Aspekt ergibt sich aus der Tatsache, dass jedes Simulationsverfahren letztlich ein „Stück Software“ darstellt, daher prinzipiell auch fehlerbehaftet sein kann. Diesem Umstand trägt die BAW

durch parallelen Einsatz verschiedener, international anerkannter und eingesetzter Simulationsverfahren Rechnung, die unter der Kurzbezeichnung TRIM, UnTRIM und Telemac in Fachkreisen bekannt sind. Da UnTRIM und Telemac heute auf Grundlage identischer Gitternetze eingesetzt werden kann, wird ein direkter Vergleich der Simulationsergebnisse durchgeführt.

Die Wirtschaftlichkeit des Modelleinsatzes ergibt sich aus einheitlichen Verfahren im Pre- und Postprocessing der Ästuarmodelle und in der Anwendung einheitlicher Standards in der Entwicklungsumgebung. Darüber hinaus entwickelt die BAW derzeit einheitliche Schnittstellen für die Kopplung verschiedener Modellbausteine. Wünschenswert ist die Harmonisierung dieser Schnittstellen mit den Entwicklungen vergleichbarer Institutionen.

Die mathematischen Modelle liefern heute wichtige Grundlagen für Entscheidungen über die Machbarkeit einer Maßnahme, für die Konzeption, Ausführung und Wirtschaftlichkeit einer Maßnahme und für die Optimierung der Seeschiffahrtsstraße nach Realisierung einer Maßnahme.

Analyse von HN-Modell-Ergebnissen im Tidegebiet

DR.-ING. GÜNTHER LANG, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME II

Einführung und Motivation

Moderne mathematische Verfahren wie *TELEMAC* oder *UnTRIM* ermöglichen 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, 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 der mathematischen Verfahren, beispielsweise Wasserspiegelauslenkung, Strömungsgeschwindigkeit und Salzgehalt, in äquidistanten Zeitabständen (z. B. alle 10 Minuten) in Dateien geschrieben. Diese sogenannten synoptischen Datensätze können im Anschluss an die hydrodynamisch-numerische (HN-) Simulation mit verschiedenen Methoden visualisiert, zu Animationen zusammengefasst oder, wie in diesem Beitrag näher beschrieben, weitergehend analysiert werden. Heute werden zumeist hoch auflösende zwei- oder dreidimensionale Gitternetze in einer HN-Simulation verwendet. Außerdem werden typischerweise Zeiträume mit einer Länge von einem oder mehreren Spring-Nipp-Zyklen simuliert. Beides zusammen führt im Ergebnis dazu, dass während einer Simulation sehr große Datenmengen anfallen, die rasch einen Umfang von mehreren Gigabyte erreichen können.

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 Tidengewässern nicht oder nur unzureichend durch ausschließliche Verwendung synoptischer Datensätze beantwortet werden. Ein Beispiel: In dem in Bild 1 dargestellten Fall ändert sich nur die Phase des Signals, während die Amplitude unverändert bleibt. Ein Vergleich der synoptischen Daten zeigt in diesem Fall zu allen Zeiten große Abweichungen zwischen den Systemzuständen. Daraus kann aber nicht ohne weiteres auf den Charakter der Veränderung des Systemverhaltens zurückgeschlossen werden, z. B. ob die mittlere Wirkung der Strömung auf den Boden in den Szenarien A und B unverändert bleibt oder nicht. Durch Wechsel der Betrachtung und Übergang zu den Kenngrößen Phase und Amplitude kann sofort gezeigt werden, dass die Amplitude unverändert bleibt, während sich die Eintrittszeiten sowohl der Maxima als auch der

Minima um eine konstante Zeitspanne verschieben. Dieses einfache Beispiel zeigt, dass Änderungen im Systemverhalten durch Rückgriff auf geeignet gewählte Kenngrößen kompakt und präzise beschrieben werden können.

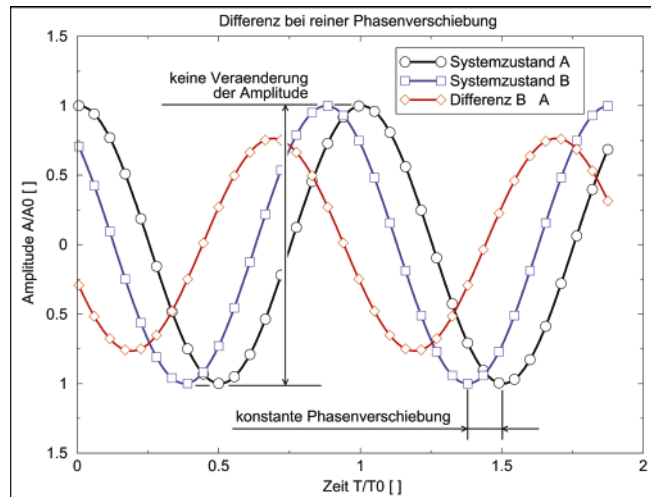


Bild 1: Differenz zwischen zwei Systemzuständen A und B bei einer Verschiebung der Phase, ohne Änderung der Amplitude

Die insbesondere von HN-Verfahren erzeugten synoptischen Datensätze werden daher zumeist im Anschluss an die Simulation weitergehend analysiert. Die wesentlichen Ziele der Analyse sind:

- Verkleinern der zur Beschreibung des Systemverhaltens erforderlichen Datenmenge im Vergleich zum Umfang der synoptischen Datensätze;
- Quantitative Beschreibung des Systemverhaltens durch geeignete Kenngrößen, z. B. Tidehochwasser, Tideniedrigwasser und Tidehub;
- Objektive Darstellung spezieller Merkmale des Systemverhaltens, z. B. Asymmetrie zwischen Ebbe- und Flutstrom;
- Herausarbeiten der Wirkungen verschiedener physikalischer Prozesse auf das Systemverhalten, z. B. barokline ästuarine Zirkulation;
- Quantifizieren unterschiedlichen Systemverhaltens anhand der Differenzen von Kenngrößen, z. B. Veränderung des Tidehubs als Reaktion auf eine anthropogen veränderte Bathymetrie.

Die nachfolgenden Abschnitte enthalten Aussagen zu den erforderlichen Eingangsdaten sowie zu den Anforderungen an die Analysemethoden. Des Weiteren werden die verfügbaren Kenngrößen und (teilweise auch) deren Definitionen vorgestellt. Den Schluss bilden Anwendungsbeispiele.

Eingangsdaten

Ausgangspunkt der Berechnung von Kenngrößen sind die schon zuvor erwähnten synoptischen Datensätze. Diese werden heute typischerweise von mathematischen HN-Verfahren erzeugt, die eine Simulation der in der Natur ablaufenden physikalischen Prozesse ermöglichen. Da HN-Verfahren auf grundlegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten (z. B. Massenerhaltung) beruhen, sind die durch Simulation erzeugten synoptischen Daten konsistent zu diesen elementaren Prinzipien. Letzteres kann auf der Basis synoptischer Beobachtungen für ein großes, zusammenhängendes Gebiet, in einer für die Analyse erforderlichen Genauigkeit praktisch nicht, oder zumindest nicht mit vertretbarem Aufwand erreicht werden.

Durch Simulation erzeugte synoptische Daten liegen räumlich und zeitlich nicht kontinuierlich, sondern nur für endlich viele diskrete Raum- und Zeitpunkte vor (siehe Bild 2).

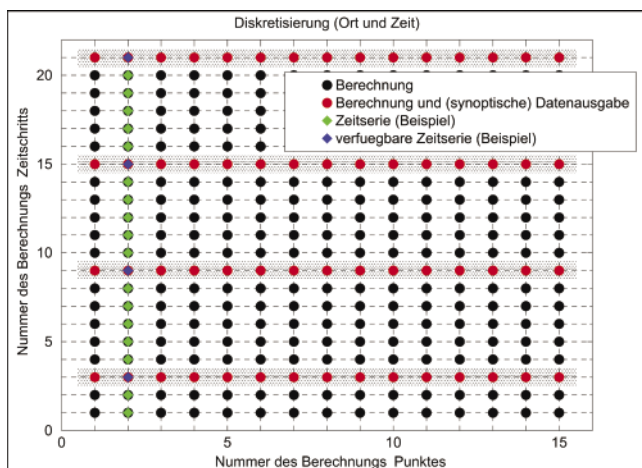


Bild 2: Schematische Darstellung einer Folge synoptischer Datensätze eines HN-Verfahrens. Diskretisierung von Raum und Zeit

Die Zeitdifferenz zwischen zwei aufeinander folgenden synoptischen Datensätzen, so wie sie von dem mathematischen Verfahren intern berechnet werden, bezeichnet man als *numerischen Zeitschritt*. *Ausgabezeitschritt* zwischen zwei der nachfolgenden Analyse zur Verfügung stehenden synoptischen Datensätzen ist in der Regel ein ganzzahliges Vielfaches des numerischen Zeitschritts.

Da im Rahmen einer Analyse u. a. die Tidehoch- und Tideniedrigwasserzeiten ermittelt werden müssen, sollte der zuvor genannte Ausgabezeitschritt nicht mehr als 20 Minuten betragen, damit diese Zeiten mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden können.

Werden für alle Berechnungspunkte die angegebenen synoptischen Daten in Zeitrichtung aufgesammelt, so

erhält man *Zeitreihen* der physikalischen Größen an allen Berechnungspunkten. Sie stehen dann ebenfalls im gesamten Simulationsgebiet zur Verfügung. Diese Zeitreihen sind die eigentlichen Eingangsdaten zur Berechnung der das Systemverhalten beschreibenden Kenngrößen.

Berechnung der Kenngrößen

Die harmonische Gezeitenanalyse für Wasserstand und Strömung stellt für den Tidebereich eine klassische Methode zur Beschreibung des Systemverhaltens dar. Auf dieses, auch in der BAW, Dienststelle Hamburg (DH), erfolgreich praktizierte Verfahren soll nachfolgend allerdings nicht näher eingegangen werden. Im Mittelpunkt der weiteren Betrachtungen stehen die sogenannten *Tidekennwerte* bzw. *tideunabhängigen Kennwerte*. Deren automatisierte Berechnung stellt einen regelmäßig wiederkehrenden Arbeitsschwerpunkt in vielen Projekten dar.

Spezielle Anforderungen

Die programmgestützte Berechnung verschiedener Kenngrößen im Tidegebiet muss mehreren Anforderungen Rechnung tragen, die sich aus dem (Tide-) Verhalten dieser Systeme ergeben. Für *jeden Ort* (Berechnungspunkt) erfüllen die in der BAW DH eingesetzten Methoden die nachstehenden Anforderungen, welche zur erfolgreichen Berechnung *tidebezogener Kenngrößen* (Tidekenngrößen) erforderlich sind:

1. Erfassen der genauen Tidehoch- und Tideniedrigwasserzeiten;
2. Erfassen der genauen Zeitpunkte der Flutstrom- sowie die Ebbestromkenterung;
3. Korrekte Zuordnung der Tidephasen zu einzelnen Tiden unter Berücksichtigung des Trockenfallens einzelner Positionen im Bereich der Wasserwechselzone (siehe Bild 3);
4. Erhöhen der Genauigkeit bei der Berechnung der oben genannten Zeitpunkte durch Interpolation des Signalverlaufs zwischen den im Ausgabezeitschritt vorliegenden Stützstellen, um den Einfluss von Abtastfehlern zu minimieren (siehe Bild 4);
5. Extrapolation des Zeitpunkts der Überflutung bzw. des Trockenfallens zum Erzielen einer erhöhten Genauigkeit beim Berechnen der Überflutungs- und Trockenfalldauer (siehe Bild 5).

Unter diesen Voraussetzungen lassen sich Kenngrößen für Ebbe-, Flut-, Ebbestrom- und Flutstromdauer sowie für die gesamte Tide mit großer Genauigkeit berechnen. Ferner können daraus Verhältniswerte, z. B. das Verhältnis zwischen Flut- und Ebbedauer abgeleitet werden. Die Interpolation reduziert den Einfluss des Ausgabezeitschritts auf die berechneten Kennwerte.

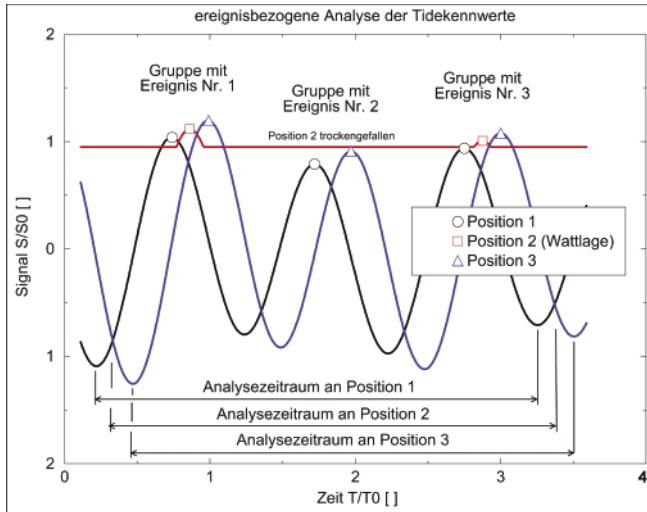


Bild 3: Korrektes Zuordnen verschiedener Tidehoch- und Tideniedrigwasserereignisse zu Gruppen unter Berücksichtigung des Trockenfallens und der Überflutung. Das Wegfallen einzelner Ereignisse an Wattpositionen muss korrekt berücksichtigt werden. Im dargestellten Fall tritt Ereignis Nr. 2 an Position 2 nicht auf. Das zweite an Position 2 vorhandene Extremum muss daher korrekt als drittes Ereignis erkannt und der entsprechenden Gruppe zugeordnet werden.

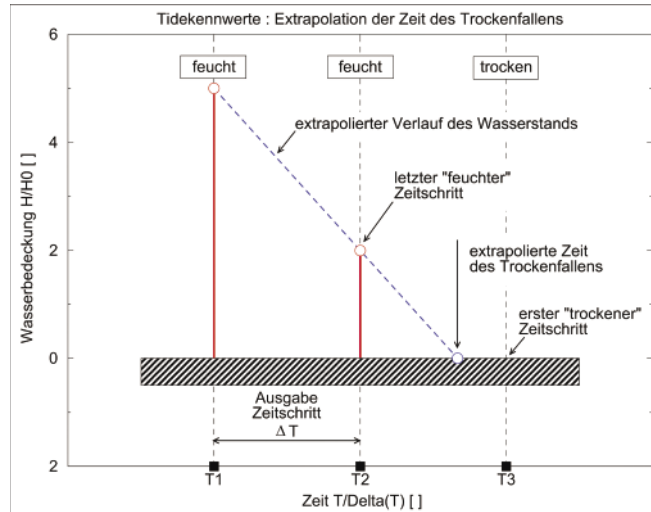


Bild 5: Extrapolation der Zeit des Trockenfallens aus zurückliegenden Wasserstandswerten zur Genauigkeitssteigerung bei der Berechnung der Überflutungsdauer

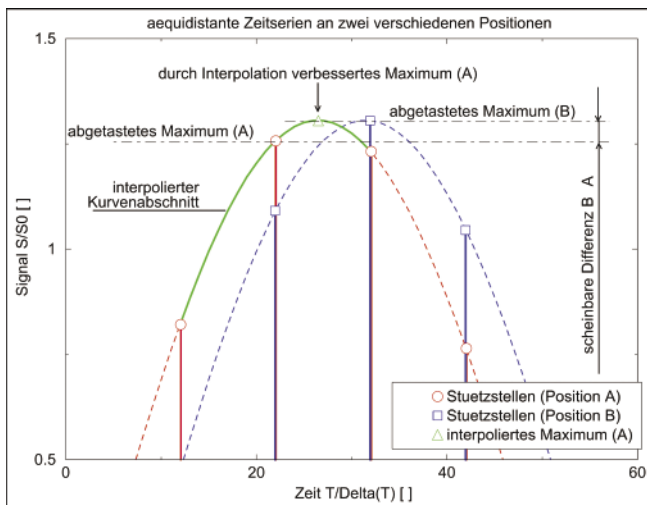


Bild 4: Interpolation in Zeitrichtung zwischen den Stützstellen einer äquidistanten Zeitreihe zur Genauigkeitsverbesserung der berechneten Extremwerte (z. B. Zeit und Wert des Tidehochwassers). Im Fall B stimmt die Lage des Maximums exakt mit einer Stützstelle überein, während im Fall A das Maximum nicht direkt abgetastet wird. Es ergeben sich scheinbare Änderungen des Maximalwertes (Abtastfehler) die sich durch Interpolation reduzieren lassen.

Berechnungsergebnisse

Aus den Zeitreihen mehrerer physikalischer Größen können durch Anwenden der in verschiedenen Computerprogrammen festgelegten Berechnungsvorschriften die Kenngrößen ermittelt werden. Hierbei handelt es sich typischerweise um

- Extremwerte (Maximum, Minimum), die
- Differenz zwischen Extremwerten (Amplitude, Variation), den
- Mittelwert oder das
- Integral

der Zeitreihe einer physikalischen Größe. Nach dem Abschluss der Berechnung liegen die Kennwerte für das gesamte Modell- bzw. Untersuchungsgebiet vor. Dies ermöglicht sowohl die Beurteilung der räumlichen Variation einer (Kenn-) Größe als auch deren zeitliche Änderung, z. B. für zwei aufeinander folgende Tiden.

Die Zahl der berechneten Analysegrößen richtet sich in der Regel nach dem Charakter der zu analysierenden Daten. Handelt es sich um (annähernd) periodische Vorgänge, die aus einer Abfolge immer wiederkehrender Ereignisse bestehen (z. B. Tiden), so werden die Kennwerte üblicherweise zunächst für alle Einzelereignisse, also für jede Tide und/oder Tidephase, ermittelt (siehe Bild 6). Im Anschluss an deren Berechnung werden schließlich noch Maximum, Minimum und Mittelwert der Kenngröße für den Analysezeitraum abgeleitet.

Wird das Systemverhalten im Analysezeitraum demgegenüber durch ein eher nicht periodisches Ereignis dominiert, wie dies z. B. bei Sturmfluten der Fall ist,

so können auch hierfür verschiedene *tideunabhängige Kenngrößen* berechnet werden (siehe Bild 7).

Vergleichbare Kenngrößen können auch für andere physikalische Größen (z. B. Salzgehalt, Schwebstoffgehalt oder Temperatur) berechnet werden. Sie lassen sich u. a. zur Abschätzung der Belastung von Fauna und Flora durch verschiedene abiotische Faktoren heranziehen.

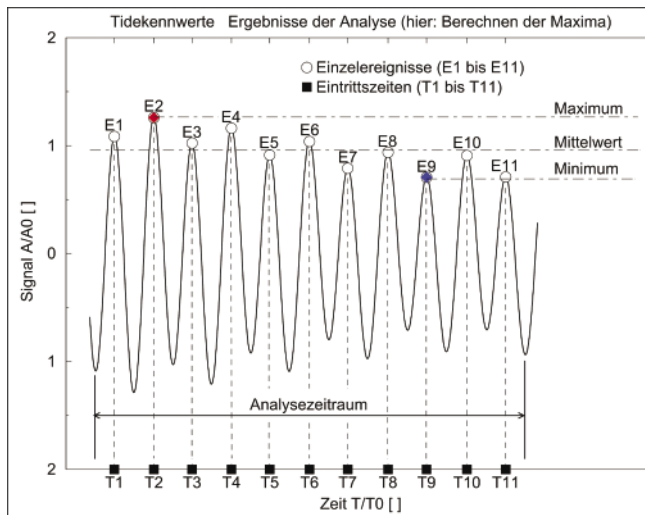


Bild 6: Schematische Darstellung der typischerweise für eine (annähernd) periodische Zeitserie ermittelten Kennwerte, z. B. Eintrittszeiten und Werte des Tidehochwassers. Die Kennwerte ermöglichen die Charakterisierung des Systemverhaltens für alle Ereignisse (hier Tiden) und, im statistischen Sinne, für den gesamten Simulationszeitraum.

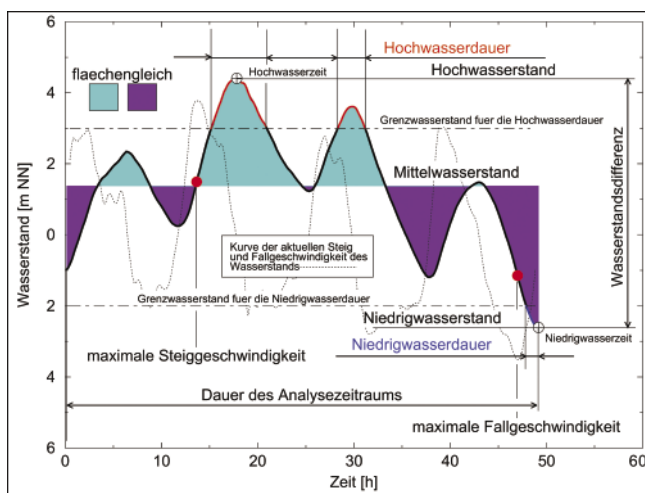


Bild 7: Kenngrößen zur Charakterisierung des Systemverhaltens für aperiodische Ereignisse. Dargestellt sind verschiedene Kenngrößen für den Wasserstand, die z. B. eine Sturmflut anhand weniger Kenndaten beschreiben können.

Differenzen zwischen Szenarien

Neben der Analyse des Systemverhaltens kommt der Beschreibung der Unterschiede im Verhalten eines Systems für verschiedene Szenarien eine große praktische Bedeutung zu. Fragen nach der Größe und den Konsequenzen anthropogener Eingriffe oder natürlicher Veränderungen stehen hier im Mittelpunkt.

Liegen Kennwerte für verschiedene Szenarien vor, so können die Differenzen zwischen ihnen berechnet werden. Zu den für alle Einzelereignisse, Maximum, Minimum und Mittelwert berechneten Differenzen gesellen sich noch die maximale sowie die minimale Differenz eines Einzelereignisses (siehe Bild 8) sowie die Signifikanz für die Abweichung der Mittelwerte. Diese Größen stehen ebenfalls an allen Berechnungspunkten im jeweiligen Untersuchungsgebiet zur Verfügung. Eine Bewertung der räumlichen Variation des Systemverhaltens ist damit in einfacher Weise möglich.

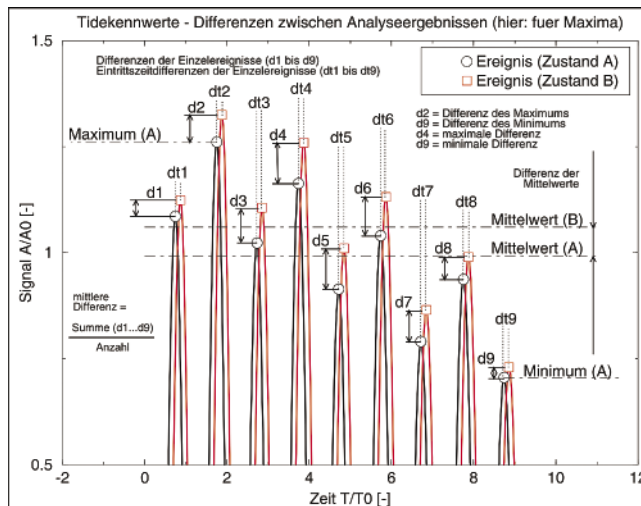


Bild 8: Schematische Darstellung der für eine Kenngröße berechneten Differenzen. Hier gezeigt am Beispiel der Maximumberechnung für eine Abfolge gleichartiger Ereignisse (z. B. Eintrittszeiten und Wert des Tidehochwassers).

Alle Kenngrößen auf einen Blick

Es folgt eine kurze Aufzählung aller Kenngrößen, die in der BAW DH standardmäßig berechnet werden können. Auf die Darstellung der Ergebnisse der ebenfalls praktizierten harmonischen Gezeitenanalyse wird an dieser Stelle, wie schon eingangs erwähnt, verzichtet.

Alle Kenngrößen können für Berechnungsergebnisse zwei- und drei-dimensionaler HN-Verfahren auf unstrukturierten Gitternetzen, entlang von Längs- und/oder Querprofilen bzw. an einzelnen Positionen, abgeleitet werden. Für querschnittsbezogene Daten lassen sich auch querschnittsgemittelte oder -integrierte Kennwerte berechnen. In Ergänzung zu den von HN-Verfahren erzeugten Datensätzen besteht für Querpro-

file oder Einzelpositionen die Möglichkeit, auch Daten aus ADCP-Messungen zu übernehmen.

Eine Berechnung der Differenzen zwischen verschiedenen Szenarien ist für alle nachfolgend aufgezählten Kenngrößen ebenfalls möglich.

Tidekenngrößen

Insofern die nachfolgenden Tidekenngrößen namensgleich mit den in DIN 4049-3 (Hydrologie – Teil 3: Begriffe zur quantitativen Hydrologie) angeführten Bezeichnungen sind, stimmen diese auch hinsichtlich ihrer Definition überein. Für alle anderen Größen wird ausschließlich auf die nachfolgenden Bildern verwiesen, da eine Definition in verbaler oder mathematischer Form nicht Bestandteil dieses Beitrags ist. Zu allen aufgezählten Kenngrößen können die in dem Abschnitt „Berechnungsergebnisse“ genannten Daten ermittelt werden.

Für den Wasserstand (siehe auch Bild 9):

- Tidehoch- (Thw) und Tideniedrigwasser (Tnw);
- Tidehub (Thb);
- Tidemittelwasser (Tmw);
- Tidehoch- und Tideniedrigwasserzeit;
- Dauer von Ebbe, Flut und gesamter Tide;
- Überflutungsdauer;
- Verhältnis zwischen Flutdauer und Ebbedauer;
- Die zuletzt genannte Größe ermöglicht eine Bewertung der Asymmetrie der Tidekurve;

Für die Strömungsgeschwindigkeit (siehe Bilder 9 und Bild 10):

- Maximale Flutstrom- / Ebbestromgeschwindigkeit;
- Mittlere Flutstrom- / Ebbestromgeschwindigkeit;
- Flutstrom- / Ebbestromvolumen;
- Flutstrom- / Ebbestromdauer;
- Flutstrom- / Ebbestromkenterung;
- Stauwasserdauer bei Flutstrom- / Ebbestromkenterung;
- Kenterpunktabstand der Flutstrom- / Ebbestromkenterung;
- Eulerscher Flutstrom- / Ebbestromweg;
- Eintrittszeit des Flutstrom- / Ebbestrommaximums;
- Eulerscher Reststrom;
- Eulerscher Reststromweg;
- Restdurchfluss;
- Tidestromvolumen;
- Verhältnis zwischen Flutstromdauer und Ebbedauer;
- Verhältnis zwischen maximaler / mittlerer Flutstromgeschwindigkeit und maximaler / mittlerer Ebbestromgeschwindigkeit;
- Verhältnis zwischen eulerschem Flutstromweg und eulerschem Ebbestromweg;

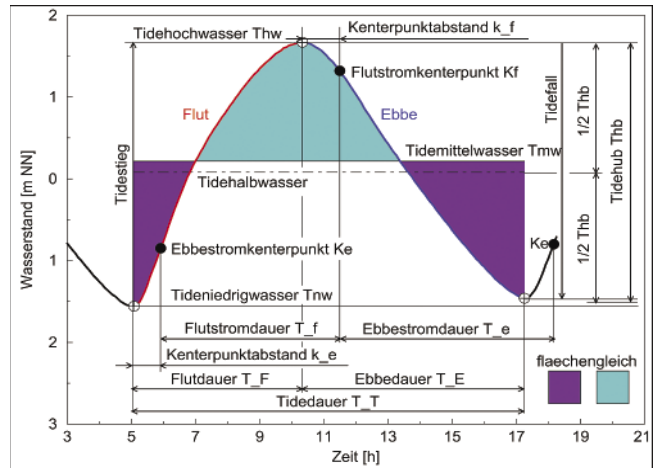


Bild 9: Verschiedene Tidekennwerte des Wasserstands (und einige der Strömungsgeschwindigkeit).

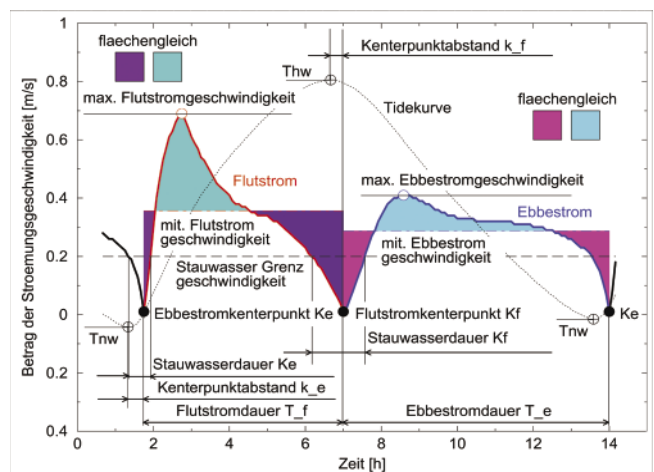


Bild 10: Einige Tidekennwerte der Strömungsgeschwindigkeit.

- Verhältnis zwischen Flutstromvolumen und Ebbestromvolumen.

Insbesondere die zuletzt genannten Verhältniswerte können zur Quantifizierung von Ungleichheiten zwischen Flutstrom und Ebbestrom genutzt werden.

Für verschiedene im Wasser transportierte Stoffe (Salz, Schwebstoff, Temperatur/Wärme) können die folgenden Kenngrößen abgeleitet werden (als Beispiel für den Salzgehalt siehe Bild 11 und Bild 12):

- Advektiver Transport durch den Flutstrom / Ebbestrom;
- Maximal-, Minimal- und Mittelwert (Tide);
- Variation (Tide);
- Residueller advektiver Transport;
- Verhältnis zwischen advektivem Transport durch den Flutstrom und advektivem Transport durch den Ebbestrom.

Für an der Sohle transportierte Sedimente können folgende Kenngrößen abgeleitet werden (Definitionen in Analogie zu Bild 12):

- Geschiebetransport durch den Flutstrom / Ebbestrom;
- Residueller Geschiebetransport;
- Verhältnis zwischen Geschiebetransport durch den Flutstrom und Geschiebetransport durch den Ebbestrom.

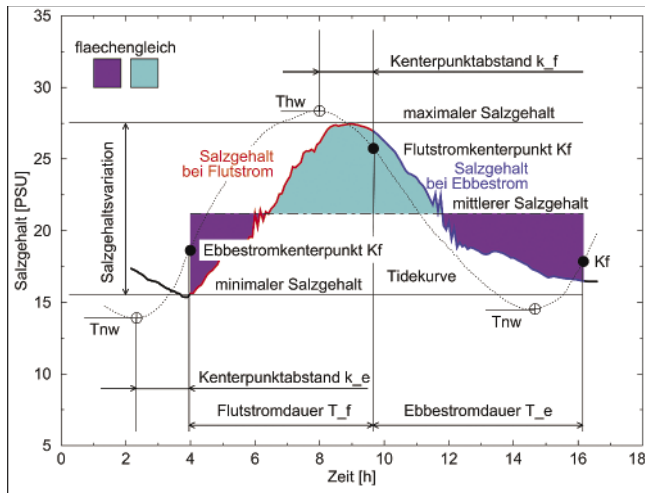


Bild 11: Einige Tidekennwerte des Salzgehalts. Analog für andere im Wasserkörper vorhandene Stoffe (z. B. Schwebstoffgehalt).

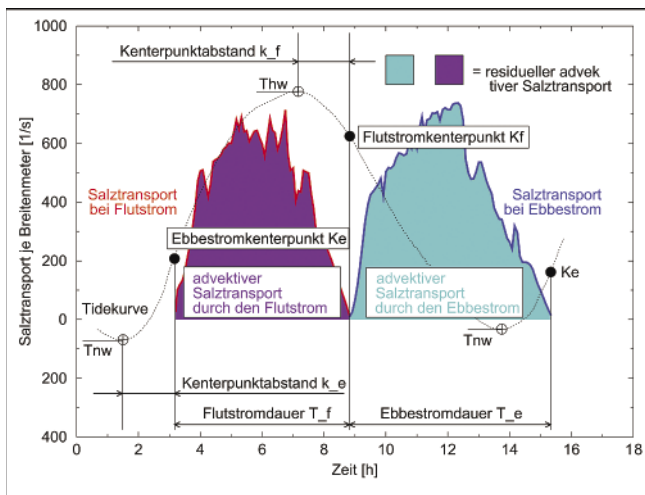


Bild 12: Einige Tidekennwerte für den Salztransport. Analog für andere im Wasserkörper oder an der Gewässer-sole transportierte Stoffe (z. B. Schwebstoff und Geschiebe).

Tideunabhängige Kennwerte

Neben dem vorgenannten umfangreichen Repertoire an Tidekennwerten können des weiteren verschiedene tideunabhängige Kennwerte für Wasserstand, Salzgehalt, Schwebstoffgehalt und Temperatur berechnet werden.

Für den Wasserstand stehen folgende Größen für den jeweils gewählten Analysezeitraum zur Verfügung (siehe Bild 7):

- Hoch-, Niedrig- und Mittelwasserstand;
- Wasserstands Differenz;
- Hoch- und Niedrigwasserzeit;
- Gesamtüberflutungs- und Gesamttrockenfalldauer;
- Maximale Steig- und maximale Fallgeschwindigkeit;
- Standardabweichung;
- Varianz;
- Dauer hoher Wasserstände (Hochwasserdauer);
- Dauer niedriger Wasserstände (Niedrigwasserdauer).

In Analogie zu den eben genannten tideunabhängigen Kenngrößen für den Wasserstand können vergleichbare Daten auch noch für den Salzgehalt, die Temperatur, den Schwebstoffgehalt sowie für die effektive Bodenschubspannung abgeleitet werden.

Zunehmend spielt die Bewertung der morphologischen Entwicklung des Bodens eine wichtige Rolle. Wesentliche Aspekte der Bodenevolution können für einen beliebigen Analysezeitraum mit Hilfe folgender Kenngrößen charakterisiert werden (siehe Bild 13):

- Maximale, minimale und mittlere Sohlentiefe;
- Maximale Änderung der Sohlentiefe;
- Veränderung der Sohlentiefe;
- Maximale Zunahme/Abnahme der Sohlentiefe;
- Summe der Erosion/Deposition;
- Kennzahl Deposition:Erosion.

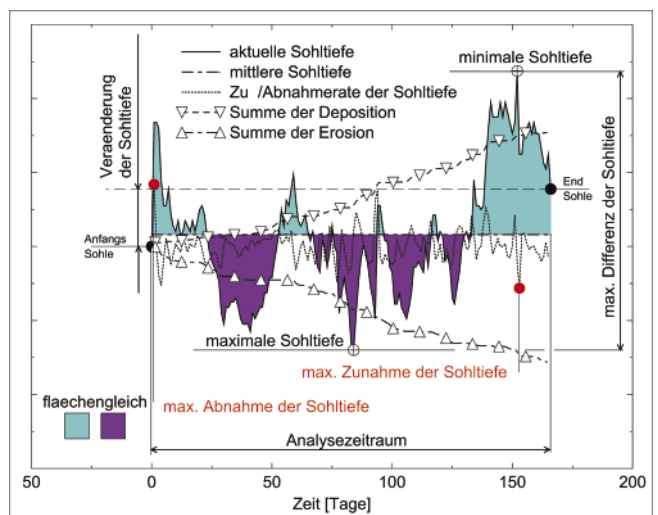


Bild 13: Einige tideunabhängige Kennwerte zur Bewertung der Bodenevolution.

Der Wind kann insbesondere bei Sturmfluten einen signifikanten Einfluss auf Wasserstand und Strömung haben. Zur näheren Charakterisierung von Starkwindereignissen im Bereich der Küsten- und Tidegewässer können folgende Kenngrößen, teilweise differenziert nach Geschwindigkeitsklassen und Richtungssektoren, aus flächenhaft vorliegenden synoptischen meteorologischen Datensätzen abgeleitet werden:

- Maximale Windgeschwindigkeit;
- Eintrittszeit für das Maximum der Windgeschwindigkeit;
- Dauer hoher / niedriger Windgeschwindigkeit;
- Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeit.

Beispiele

Baroklin beeinflusste Strömung

Die Strömung im Tidegebiet wird maßgeblich durch das Steigen und Fallen des Wasserstands und dem davon verursachten barotropen Druckgradienten angetrieben. In Gebieten, in denen zusätzlich nennenswerte horizontale Dichteunterschiede existieren, kommen noch die baroklinen Druckgradienten hinzu, deren Wirkung quadratisch mit der Wassertiefe anwächst und daher insbesondere in den tiefen Rinnen der Ästuarer wirksam wird. Dreidimensionale mathematische Ver-

fahren berücksichtigen beide Druckkomponenten und sind daher in der Lage, die in diesen Regionen vorhandenen Dichte-induzierten Strömungen (barokline Zirkulation) in naturähnlicher Weise zu simulieren. Da der Salzgehalt im Ästuar vom Land zum Meer hin ansteigt, weist der Dichtegradient und damit auch der Dichte-induzierte Strömungsanteil in die entgegengesetzte Richtung, also stromauf. In Bild 14 ist der aus Ergebnissen eines 3D-HN-Modells abgeleitete Reststrom für ein Querprofil bei Elbe-km 720 dargestellt. Die vorgenannte Wirkung des baroklinen Druckgradienten ist darin für das Hauptfahrwasser deutlich zu erkennen. Sichtbar wird ein sohnaher Stromauf-Transport von Wasser und den darin enthaltenen Stoffen. Die lokale Dominanz des Flutstromes im sohnahen Bereich des Hauptfahrwassers der Elbe tritt auch in einer Darstellung des Verhältniswertes zwischen der mittleren Flutstromgeschwindigkeit und der mittleren Ebbestromgeschwindigkeit deutlich hervor (siehe Bild 15).

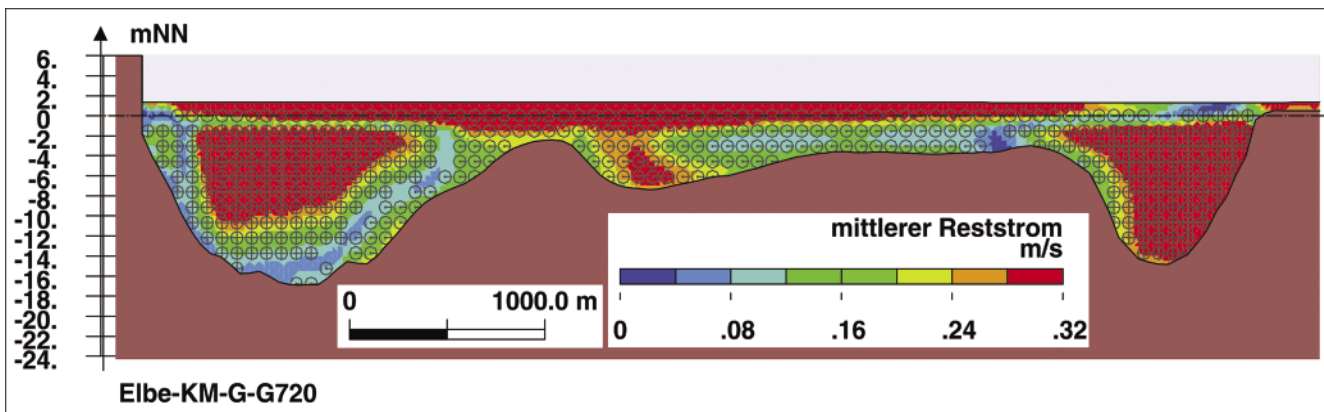


Bild 14: Mittlere Reststromgeschwindigkeit für einen Querschnitt bei Elbe-km 720 (50fach überhöht). Links die tiefe Rinne mit dem Hauptfahrwasser. Rechts die kleinere und weniger tiefe Medemrinne. Dazwischen der flache Medemgrund. Blickrichtung stromabwärts, mit dem niedersächsischen Ufer auf der linken und dem schleswig-holsteinischen Ufer auf der rechten Seite. Der Reststrom ist im Kernbereich des Fahrwassers sowie in der Medemrinne seewärts (vom Betrachter fort) orientiert. Dem gegenüber weist der Reststrom auf dem flachen Medemgrund stromauf (auf den Betrachter zu). Dieselbe Orientierung kann man sohnah auch in der rechten Hälfte des Fahrwassers erkennen.

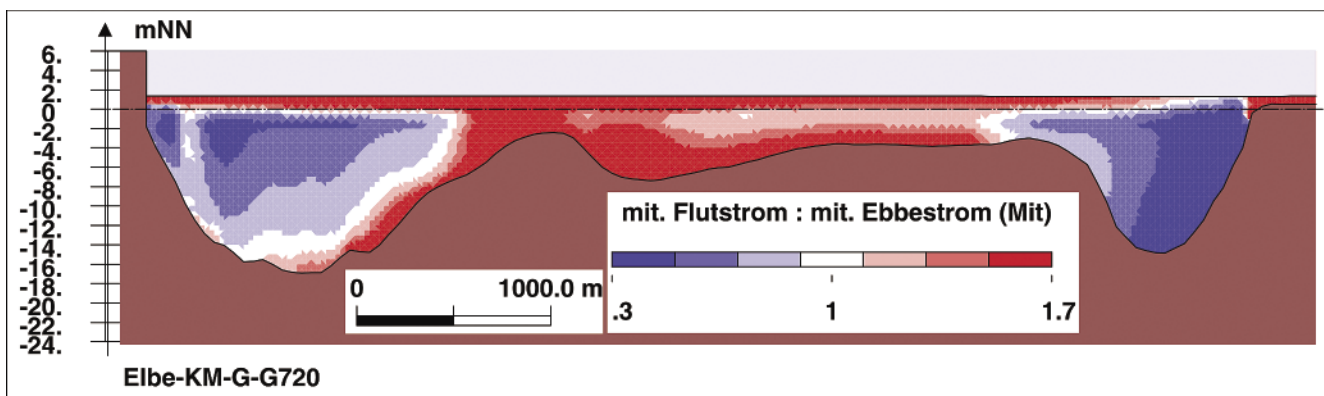


Bild 15: Verhältnis zwischen mittlerer Flutstrom- und mittlerer Ebbestromgeschwindigkeit für einen Querschnitt bei Elbe-km 720 (Querschnitt ist identisch mit dem in Bild 14; für geographische Bezeichnungen siehe dort; 50fach überhöht). In den rot dargestellten Bereichen ist die mittlere Flutstromgeschwindigkeit größer als die mittlere Ebbestromgeschwindigkeit, in den blauen Bereichen ist es hingegen umgekehrt. In Übereinstimmung mit Bild 14 ist zu erkennen, dass der Abfluss des Wassers überwiegend im Kernbereich des Hauptfahrwassers bzw. über die Medemrinne erfolgt (Ebbdominanz). Flutdominanz ist über dem flachen Medemgrund sowie im sohnahen Bereich des Hauptfahrwassers vorhanden.

Änderung von Kenngrößen

Die Differenzen zwischen verschiedenen Kenngrößen werden, wie schon zuvor erwähnt, zur Beschreibung von Änderungen des Systemverhaltens als Folge z. B. anthropogener Eingriffe oder natürlich ablaufender Veränderungen eingesetzt. In Bild 16 sind beispielhaft die für eine Fahrwasservertiefung im Elbeästuar berechneten Differenzen verschiedener Tidekenngößen des Wasserstands dargestellt. Da keine Tide mit einer vorangehenden oder nachfolgenden vollkommen übereinstimmt, resultiert für jede Kenngröße ein Band der Veränderung. Die Breite des Bandes beschreibt die Spannbreite möglicher Änderungen des Systemverhaltens in anschaulicher Weise. Daraus kann u. a. die Empfindlichkeit der jeweiligen (Kenn-) Größe gegenüber der veränderten Anregung durch unterschiedliche Tiden abgelesen werden. Nach Analyse sehr vieler Tiden folgt daraus eine realistische Abschätzung der wahrscheinlichen maximalen, minimalen und mittleren Änderungen der jeweiligen Kenngrößen.

Schlussbemerkungen

Die in diesem Beitrag aufgezählten Kenngrößen werden seit vielen Jahren erfolgreich zur Darstellung der Wirkungen anthropogener Eingriffe in die Seeschiffahrtsstraßen an Nord- und Ostsee auf das Systemverhalten des jeweiligen (Tide-) Gewässers eingesetzt. Die in diesem Zusammenhang überwiegend aus dem Einsatz mehrdimensionaler HN-Modelle abgeleiteten Ergebnisse waren und bleiben daher eine unverzichtbare Basis unserer Arbeit. Neben Antworten auf konkrete projektbezogene Fragestellungen leisten die Kenngrößen darüber hinaus einen wertvollen Beitrag zum allgemeinen besseren Verständnis des Systemverhaltens der Tidegewässer.

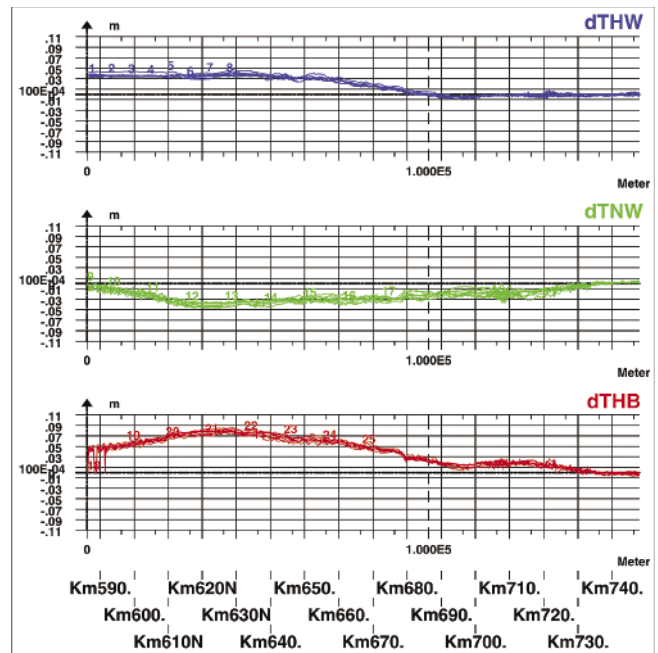


Bild 16: Differenzen verschiedener Tidekenngößen für ein Längsprofil durch das Elbe-Ästuar. Dargestellt sind die durch eine anthropogene Fahrwasservertiefung hervorgerufenen Veränderungen des Tidehochwassers (dThw), des Tideniedrigwassers (dTnw) sowie des Tidehubs (dThb) für insgesamt acht Tidehochwasserereignisse sowie neun Tideniedrigwasserereignisse. Das für jede Kenngröße sichtbare Band der Veränderung zeigt in diesem Beispiel die Empfindlichkeit der jeweiligen Größe gegenüber der veränderten Anregung durch unterschiedliche Tiden an.

Zur dreidimensionalen Simulation von Strömungs- und Transportprozessen in Ästuaren

DR.-ING. HOLGER WEILBEER, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME II

Die Strömungs- und Transportprozesse im Mündungsgebiet der Flüsse – den Ästuaren – werden seit mittlerweile mehr als zwei Jahrzehnten auch mit Hilfe dreidimensionaler HN-Modelle untersucht und sind somit stets eine starke Triebkraft für deren Weiterentwicklung gewesen. Die besondere Herausforderung liegt dabei in der Simulation dreidimensionaler Effekte, die sich aus der Änderung der Fluiddichte infolge horizontaler und vertikaler Gradienten der Salz- und Schwebstoffkonzentrationen und gegebenenfalls aus Temperaturgradienten ergeben, also in der Simulation von Dichteströmungen und deren induzierender Prozesse. In der nachfolgenden Grafik (Bild 1) sind die wesentlichen Einflussgrößen und Prozesse des Gesamtsystems Ästuar dargestellt.

len überlagert. Mit der Strömung werden verschiedene Substanzen in gelöster oder in partikulärer Form transportiert. Besonders charakteristisch für ein Ästuar ist dabei das Aufeinandertreffen und das Vermischen von salzhaltigem Meerwasser mit dem Süßwasser des Oberwasserzuflusses. In Abhängigkeit des Ästuartyps sind die daraus resultierenden Dichteeffekte unterschiedlich stark ausgeprägt.

An den mikrotidalen Ostseeästuaren wie der Trave oder der Warnow ist in der Regel ein starker Salinitätsgradient in der Vertikalen zu beobachten (Bild 2), d. h. der Wasserkörper weist eine stabile Dichteschichtung auf, die durch das Zusammenwirken von Oberwasserzufluss, lokalem Windfeld und Salinität am seeseitigen Rand bestimmt wird.

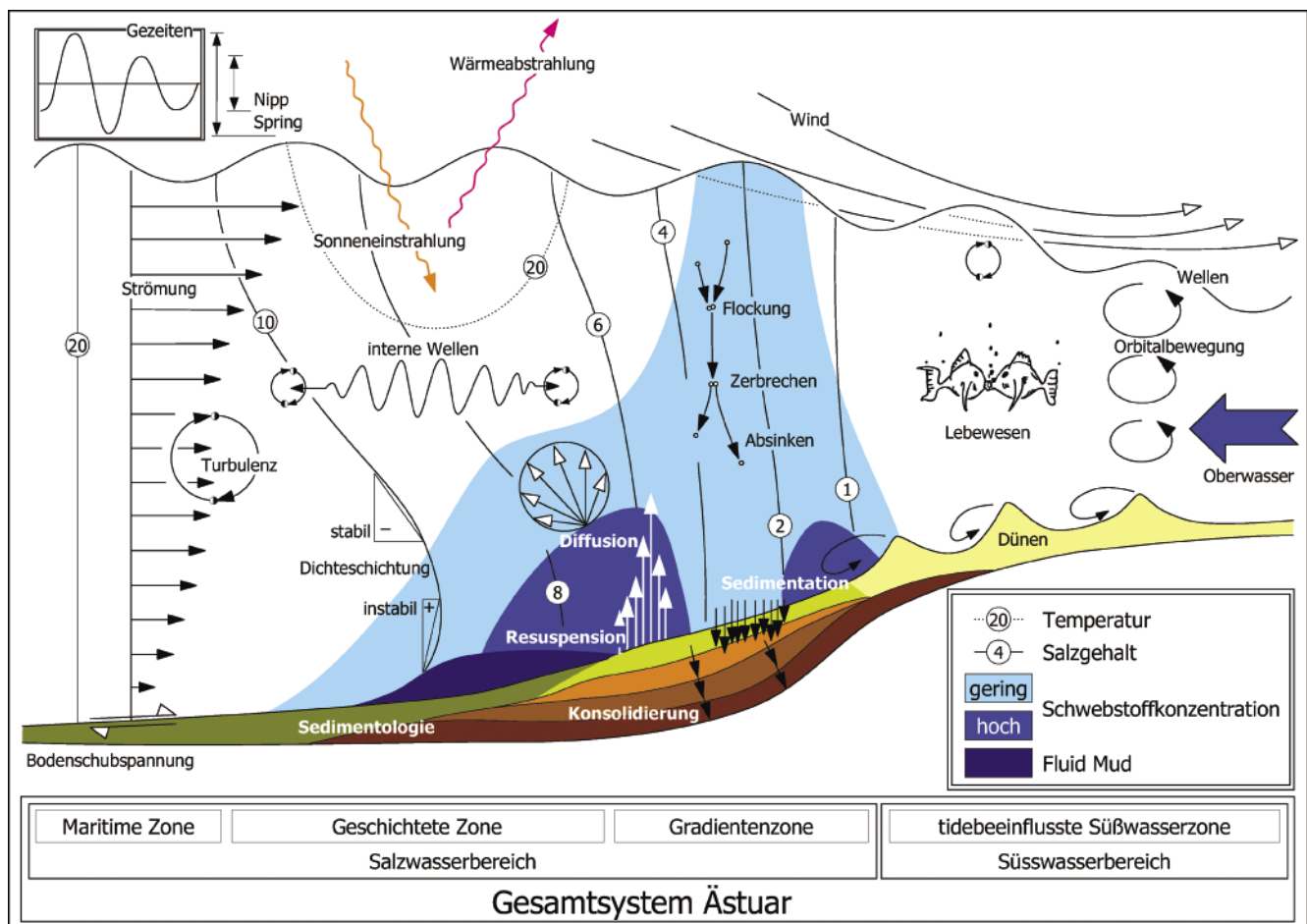


Bild1: Einflussgrößen und Teilprozesse im Gesamtsystem Ästuar

Strömungen und Wasserstände sind primär durch den Gezeiteneinfluss am seeseitigen Rand dominiert, sie werden aber auch durch den Oberwasserzufluss und den Wind beeinflusst und sind zudem durch Wel-

An den stärker gezeitendominierten Nordseeästuaren zeigt sich ein gänzlich anderes Bild. Bei voll ausgebildeten Ebb- oder Flutströmungen ist der Wasserkörper durch die intensivere Turbulenz gut durchmischt, d. h.

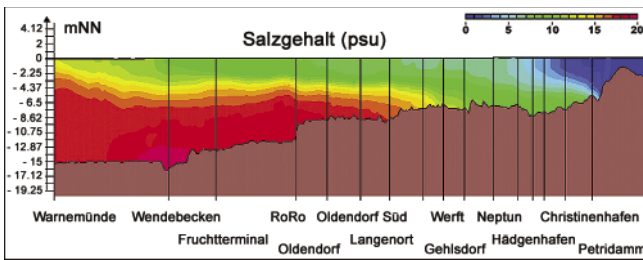


Bild 2: Salzgehaltsverteilung im Längsschnitt durch die Warnow (TRIM-3D)

dass in diesen Phasen kaum Salinitätsgradienten in der Vertikalen zu beobachten sind. Nahe der Kenterpunkte können sich jedoch vor allem auf Grund von Massenträgheitseffekten sehr komplizierte dreidimensionale Strömungen ergeben, da sich zum einen in der Vertikalen kurzzeitig labile Schichtungen einstellen können (die Strömungsgeschwindigkeit ist nahe der Oberfläche größer als an der Sohle), und sich zum anderen laterale Dichtegradien ausbilden (die Strömungsgeschwindigkeit ist in der Fahrrinne größer als in Ufernähe). Das Geschwindigkeitsfeld erhält dadurch dichteinduzierte Sekundärkomponenten. In Bild 3 und Bild 4 lassen sich die Vertikalgradienten der Salzgehaltsverteilung in der Elbe gut erkennen.

Ein weiterer Transportvorgang von großer Bedeutung ist der Sedimenttransport in all seinen Erscheinungsformen und Auswirkungen auf die Morphologie des Ästuars. Hier dominiert der Schwebstofftransport das Geschehen, wobei im Übergangsbereich zwischen Süßwasser und Salzwasser ein Zone erhöhter Trübung etabliert ist. Anders als gelöste Substanzen besitzen suspendierte Sedimente eine eigene Dynamik, die besonders durch eine sedimentspezifische Sinkgeschwindigkeit geprägt ist.

Auf Grund dieser Sedimenteigenschaft kommt es zu einem durch den Tidezyklus bestimmten periodischen Deponieren und Resuspendieren von Sedimentmassen (siehe Bilder 3 und 4) und in Verbindung mit einer Asymmetrie der Tide möglicherweise zu einem Netto-transport stromauf des Ästuars. Gelangen suspendierte Feinsedimente in schwach durchströmte Bereiche wie z. B. Hafenbecken oder Flachwasserzonen können sie dort auch länger liegenbleiben, konsolidieren und dadurch morphologische Veränderungen bewirken. In stärker durchströmten Abschnitten und in Bereichen mit Seegangseinfluss kommen eher sandige Sedimente vor, die Sohlformen wie Riffel oder Dünen ausbilden können.

Bei der Simulation dieser Prozesse mit mathematischen Modellen werden Atmosphäre, Hydrosphäre und Lithosphäre in gekoppelten Modulen oder separaten Modellen behandelt, die an ihren Grenzflächen Stoff- und/oder Impulsflüsse austauschen. Ein Atmosphärenmodell berechnet Wind- und Luftdruckfelder, die in den Hydrosphärenmodellen für Seegang und

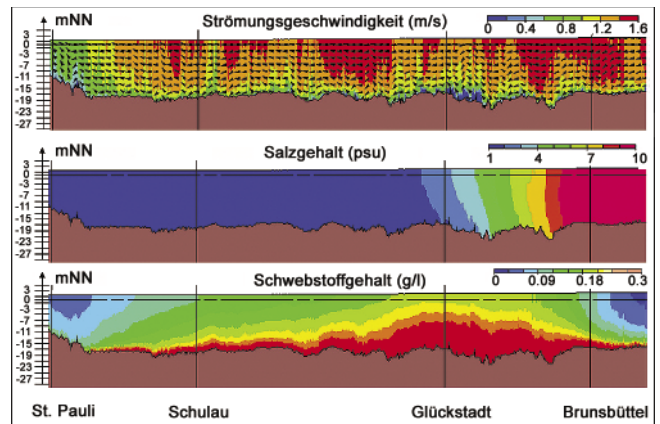


Bild 3: Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalts- und Schwebstoffverteilung im Längsschnitt durch das Elbeästuar bei vollem Flutstrom (UnTrim + SediMorph)

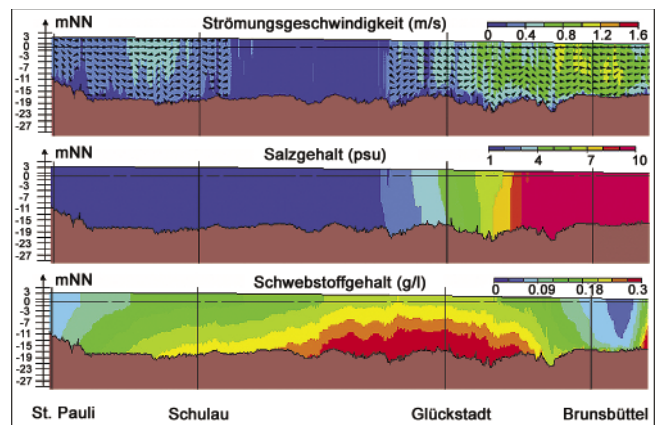


Bild 4: Strömungsgeschwindigkeiten, Salzgehalts- und Schwebstoffverteilung im Längsschnitt durch das Elbeästuar bei beginnendem Ebbstrom (UnTrim + SediMorph)

Strömung zusätzliche Kräfte bzw. Spannungen an der Oberfläche induzieren. An der Gewässersohle interagieren Hydrodynamik und Morphodynamik in enger Wechselwirkung. Die Beschreibung des Aufbaus und der Veränderung des Bodens, d. h. die Verwaltung des Sedimentinventars, die Modellierung von Erosion oder Konsolidierung, die Genese von Riffeln oder Dünen etc. ist wiederum Aufgabe eines selbständigen Lithosphärenmodells, das bei der BAW, Dienststelle Hamburg, durch SediMorph realisiert ist. Alle Strömungs- und Transportprozesse im Wasserkörper werden hingegen in Strömungsmodellen wie UnTrim, TRIM oder Telemac behandelt. Die hier beschriebenen Dichteeffekte erfordern eine dreidimensionale Auflösung des Untersuchungsgebietes. Die Wechselwirkungen zwischen Strömungs- und Stofftransportprozessen sind in Bild 5 schematisch dargestellt.

Die primären Ergebnisse eines Strömungsmodells sind (dreidimensionale) Strömungsgeschwindigkeiten u und Wasserstände h , mit denen unter Verwendung der turbulenten Viskosität ν_t die Advektion und die Diffusion der zu transportierenden Größen wie Salz

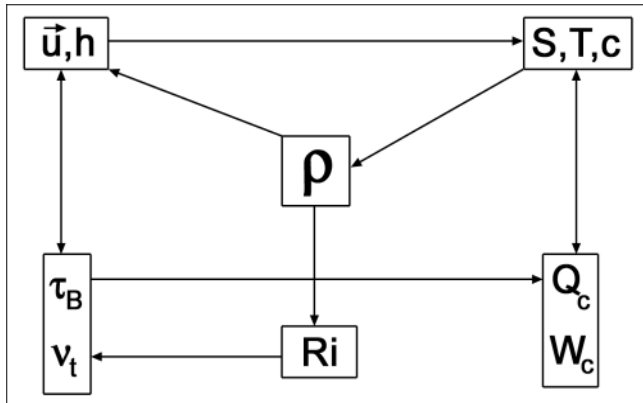


Bild 5: Wechselwirkungen zwischen Strömungs- und Stofftransportprozessen

S , Temperatur T und Schwebstoff c berechnet werden kann. Bei der Lösung der Schwebstofftransportgleichung muss aber wie oben erwähnt die Sinkgeschwindigkeit w_c als zusätzliche Vertikalkomponente berücksichtigt werden. Einleitungen und Entnahmen z. B. von Kühlwasser werden über Quell- und Senkterme modelliert, die beim Schwebstofftransport die Materialflüsse aus der bzw. in die Wassersäule bei Erosion und Deposition beschreiben. Den dominierenden Einfluss hat dabei die Sohlschubspannung τ_B , die nicht nur wichtig für die Dissipation der Strömungsenergie und den Grad der Turbulenz ist, sondern auch die Stärke des Erosionsstromes Q_c bestimmt.

Der Einfluss der variablen Salzkonzentrationen und Wassertemperaturen auf die Fluidichte kann über eine empirische Zustandsgleichung für Meerwasser berechnet werden (UNESCO, EOS80). Dieser Dichte wird dann noch bei Bedarf die Massenkonzentration des Schwebstoffes überlagert.

Die veränderliche Gesamtdichte wirkt über zwei verschiedene Wege auf die Hydrodynamik ein. Ein direkter Einfluss erfolgt durch den Druckterm in den Impulsgleichungen, da dort die Dichte ρ als Variable enthalten ist. Dichteströmungen sind somit automatisch Bestandteil der Ergebnisse dreidimensionaler Modelle. Ein zweiter Weg ist indirekt und basiert auf der Annahme, dass eine stabile Schichtung einen dämpfenden Einfluss auf die Turbulenz hat (d. h. v_t müsste kleiner werden), eine instabile Dichteschichtung hingegen den turbulenten Austausch in der Vertikalen anfacht. In den HN-Modellen wird dieser Annahme entweder durch Dämpfungsfunktionen für algebraische Turbulenzmodelle oder durch einen zusätzlichen Dämpfungsterm in Zwei-Gleichungs-Turbulenzmodellen Rechnung getragen. Eine Maßzahl für die Stabilität einer Schichtung ist die Richardson-Zahl, eine Funktion des Dichte- und des Geschwindigkeitsgradienten, die zu leider wenig allgemeingültigen Parametrisierungen der oben be-

schriebenen Effekte in den empirischen Dämpfungsfunktionen verwendet wird.

Die soeben beschriebenen Abhängigkeiten und Modellansätze bzw. Parametrisierungen belegen beispielhaft die Komplexität und Sensitivität eines Gesamtsystems Ästuar. Wenngleich die Ergebnisse, die sich mit einem solchen Modell erzielen lassen, bereits sehr naturähnlich sind und belastbare Aussagen liefern, so zeigt dennoch ein genauerer Blick auf Teilprozesse sofort die Notwendigkeit auf, kontinuierlich weiter zu forschen, um im Zusammenwirken mit Naturuntersuchungen bekannte Ansätze zu überprüfen und eventuell zu verbessern oder auch neue Ansätze zu entwickeln, um so die Modellbildung zur Beschreibung der komplizierten Wechselwirkungen stetig zu verbessern. Als ein Beispiel sei der Einfluss der Sedimentkonzentration auf die Hydrodynamik genannt, die nur bei geringen Massenkonzentrationen wie oben beschrieben berücksichtigt werden darf. Bei hohen Konzentrationen, wie sie gelegentlich sohnah oder bei der Bildung von *Fluid Mud* auftreten dürften, wird die Gültigkeit der Modellannahmen verletzt, und man wird gezwungen, diese Phänomene z. B. als Mehrphasenproblem zu beschreiben. Als ein im Übergangsbereich zwischen Hydrosphäre und Lithosphäre lokalisiertes Phänomen wird es wohl eine Aufgabe sein, die in SediMorph gelöst werden wird.

Zuletzt sei noch erwähnt, dass die bisherigen Erfahrungen in der hydro- und morphodynamischen Simulation ästuariner Prozesse eine starke Abhängigkeit der Qualität der Sedimenttransportergebnisse von der Güte und dem Umfang der Sedimenteingangsdaten zeigen. Die Anforderungen, die an diese Daten gestellt werden, dürften recht bald die Anforderungen z. B. an topografische Daten übersteigen.

Vom Sohlevolutions- zum vollständigen Morphologiemodell: Eine Road Map zur SediMorph-Entwicklung

DR.-ING. HABIL. ANDREAS MALCHEREK, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME I

1 Veranlassung und Aufgabenstellung

Die Prognose ausbaubedingter morphologischer Änderungen des Gewässerbettes in seiner Lage stellt eine wissenschaftliche Herausforderung höchsten Maßes dar.

Zur Bearbeitung der mit ihr verbundenen Fachaufgabe hat die BAW im Jahr 2002 das Projekt SediMorph aus der Taufe gehoben. Dieses besteht aus der Entwicklung eines Moduls zur dreidimensionalen fraktionierten Modellierung der Morphologie von Sedimentsohlen und den dort stattfindenden Sedimenttransportprozessen.

Mit der Entwicklung dieses Simulationskernes ist es allerdings nicht getan, da es sich hierbei um eine neue Schlüsseltechnologie handelt, die Anforderungen an die sedimentologische Datenerhebung, -verwaltung und -verarbeitung, als auch die Nachbearbeitung und Interpretation der Ergebnisse in Gutachten stellt.

Das vorliegende Dokument soll den bisherigen Stand des Projektes darstellen, sowie die Richtungen zukünftiger Entwicklungen skizzieren.

2 Die Grundfunktionen des SediMorph-Modells

SediMorph wird den sehr vielfältigen Anforderungen des Sedimenttransports und der Morphodynamik nur dann gerecht, wenn es prinzipiell in der Lage ist, beliebige Arten von Sedimentböden zu beschreiben. Die dazu erforderliche Flexibilität wird dadurch gewährleistet, dass es aus der Sicht der Datenstrukturen eigentlich ein dreidimensionales Mehrkomponentenmodell ist, wobei der Anwender die konstitutionellen physikalischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten selbst definiert. Diese einzelnen Komponenten sind in SediMorph die unterschiedlichen Sedimentklassen und das Porenwasser. Es können prinzipiell aber auch andere, wie z. B. biologische Komponenten definiert werden.

SediMorph verwaltet hierzu ein dreidimensionales Gitter, welches in Bild 1 dargestellt ist. Dieses besteht aus einem horizontalen Gitter, welches in der Vertikalen vervielfältigt wird, so dass einzelne Schichten aufgespannt werden. Jede einzelne der so entstehenden Volumenzellen beinhaltet Angaben darüber, zu wie viel

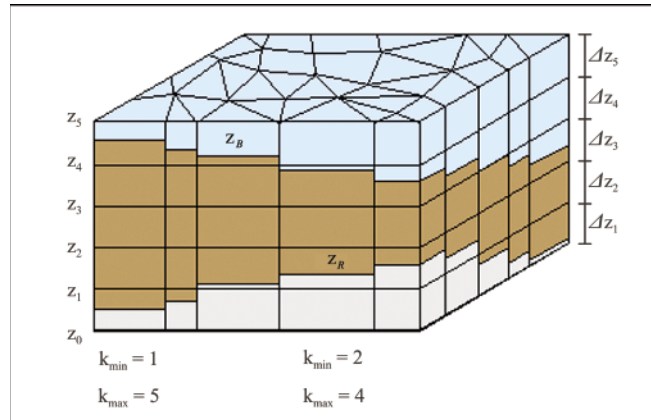


Bild 1: Struktur eines morphologischen Datensatzes. Die Draufsicht zeigt das horizontale Gitter. In Blau die Bereiche der Wassersäule, in Grau die des unerozierbaren Grundes, die jeweils nicht mit sedimentologischen Daten belegt werden müssen.

Prozent ihr Volumen mit den einzelnen Sedimentklassen bzw. mit Porenwasser aufgefüllt ist.

SediMorph setzt somit die Gültigkeit der Kontinuums-hypothese voraus, kann also Einzelpartikel und deren Bewegungen nicht simulieren.

Eine weitere Anforderung an SediMorph ist die Koppelbarkeit mit nahezu beliebigen HN-Modellen. Diese Koppelbarkeit wird durch eine besondere horizontale Gitterstruktur, durch die Bereitstellung entsprechender Interpolationsverfahren und durch eine sehr allgemeine Benutzerschnittstelle (der Benutzer ist hier das HN-Modell) gewährleistet. SediMorph ist bisher erfolgreich mit den HN-Modellen UnTrim (Finite Volumen) und Telemac-2D (Finite Elemente) gekoppelt.

Zur direkten Simulation der Morphodynamik löst SediMorph die Sohlevolutionsgleichung. Die Geschiebetransportraten werden durch verschiedene fraktionierte Transportformeln berechnet, ferner modelliert SediMorph Sohländerungen durch den Transport von Schwebstoffen, überlässt die Lösung der Schwebstofftransportgleichung allerdings dem HN-Modell.

Die über der Sohle befindlichen Strömungen spüren nur die oberste Sedimentschicht und deren Zusammensetzung. Diese gespürte oberste Schicht kann wesentlich dünner als die vom Anwender definierte oberste Gitterschicht sein. In SediMorph wird dieser Sachverhalt durch ein Austauschschichtkonzept berücksichtigt, womit auch die Ausbildung von Deckschichten

simuliert werden kann [Sendzik,W., 2003].

Die dargestellten Grundfunktionen des SediMorph-Modells wurden bis auf einige Detailprobleme implementiert, erprobt und stehen nun in der Anwendungsphase, d. h. werden auch in Gutachten angewendet.

3 Die Sedimentinventarisierung

Die ehernen Gesetze der Dynamik kann man als Berechnungsvorschriften deuten, die ausgehend von einem Anfangszustand eines Systems dessen Folgeverhalten bestimmen. So werden auch die noch zu entwickelnden morphodynamischen Gesetzmäßigkeiten erst dann anwendbar, wenn wir einen Anfangszustand, d. h. die Morphologie des Bodens in einem Untersuchungsgebiet vollständig erfasst haben.

Im Fall von SediMorph heißt dies, dass für jede Zelle des morphologischen Datensatzes die vollständigen Informationen über die Sedimentzusammensetzung entsprechend der von User gewählten Sedimentklassifizierung vorliegen. Hier besteht noch erheblicher Entwicklungsbedarf.

Zunächst muss ein **Mess- bzw. Probenahme**konzept entwickelt werden, welches mittel- bis langfristig den Anforderungen der morphodynamischen Modellierung gerecht wird.

Aufbauend auf einem Geoinformationssystem soll ein **Sedimentinformationssystem (SIS)** eine einheitliche Erfassung, Speicherung und Nutzung der erhobenen Daten auf WSV-Ebene ermöglichen (Bild 2).

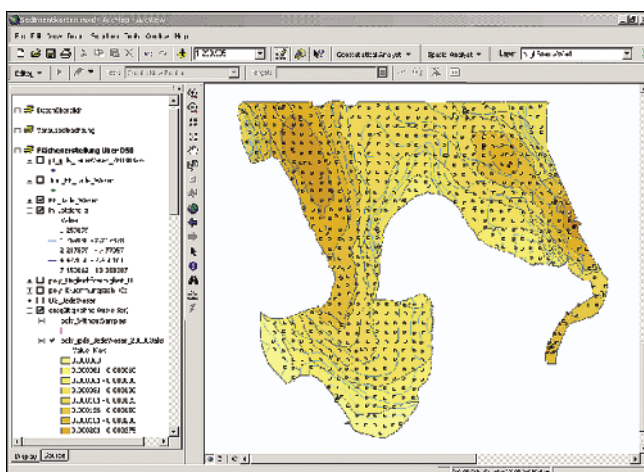


Bild 2: Oberfläche eines sedimentologischen Informationssystems (ARCVIEW) zur Darstellung der in einer Datenbank vorhandenen Probenahmepunkte (aus [Schneider, A.-K., 2003]).

4 Zukünftige Weiterentwicklungen des SediMorph-Kerns

Um den wesentlich weitergehenden Anforderungen der Küsten- als auch fluvialen Morphodynamik gerecht zu werden, muss der SediMorph-Kern in erheblichem Maße weiterentwickelt werden.

4.1 Sohlstrukturen

Sohlstrukturen sind Muster der Sedimentoberfläche, die in enger Wechselwirkung zwischen der Strömung und dem Sedimenttransport entstehen. Diese Sohlstrukturen lassen sich nach ihren Abmessungen in Mikrostrukturen (z. B. Riffel), Mesostrukturen (z. B. Dünen) und Makrostrukturen (z. B. Bänke, Kolke) unterscheiden.

Auf der numerischen Modellebene ist allerdings folgende Einteilung in von der horizontalen Geometrie aufgelöste und nicht aufgelöste Strukturen sinnvoll. Die sogenannten Subgrid-Scale-Strukturen müssen dann parametrisch erfasst werden.

In der Morphodynamik der Küstengewässer sind vor allem Dünenstrecken von großer Bedeutung. Daher wurde in der vorliegenden SediMorph-Version ein erster Ansatz zur Vorhersage von Dünen implementiert. Die Ergebnisse für die Außenweser sind erfolgversprechend (Bild 3).

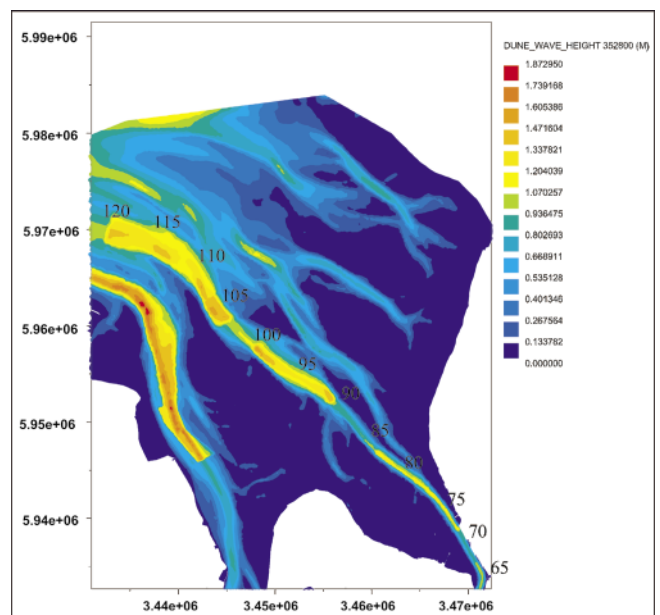


Bild 3: Erste Prognosen zur Verifikation des Dünenmodells. Im Bereich der Außenweser sind die Ergebnisse plausibel, die Vorhersage von Dünen in der Außenjade muss allerdings noch korrigiert werden (aus [Putzar, B., 2003]).

Neben der Weiterentwicklung dieses Moduls zur Vorhersagen von Dünen müssen weitere für Megariffel, Riffel, Bänke etc. hinzutreten.

4.2 Porenwasser

Neben der Kornmatrix ist das Porenwasser der wichtigste Bestandteil des Bodens und macht diesen zu einem Mehrphasensystem. Die Menge des in den Bodensedimenten gebundenen Porenwassers beeinflusst alle physikalischen Prozesse, mit denen die Phänomene des Sedimenttransports und der Morphodynamik verbunden sind. Dies sei anhand der Tabellen 1 und 2 verdeutlicht.

C	Medium	Vertikal-Bewegung	Transport	Rheologie	Turbulenz
< 1g/l	Wässrige Suspension	freies Sinken	advektiv	Newton	unbeeinflusst
> 1g/l	Konzentrierte Suspension	hindered settling	advektiv	Newton	gedämpft
> 100g/l	Fluid Mud	hindered settling	Scher-Strömung	Bingham	nicht vorhanden
> 250g/l	Konsolidierter Boden	Absetzen	nicht vorhanden	Prandtl	nicht vorhanden

Tabelle 1: Klassifikation der Prozesse nach der Konzentration

In Tabelle 1 sind die wesentlichen Sedimenttransportprozesse in Abhängigkeit von der Feststoffkonzentration *c* dargestellt. SediMorph wird sich dabei voraussichtlich auf die Prozesse in hochkonzentrierten Lösungen konzentrieren, eine Modellierung des Transportes von Fluid Mud ist nicht ausgeschlossen.

Von / nach	Suspension	Fluid Mud	Fester Boden
Suspension	-	Deposition	(Deposition)
Fluid Mud	Entrainment	-	Konsolidierung
Fester Boden	Erosion	Liquefaktion	-

Tabelle 2: Phasenübergänge und Wasser / Feststoffgemische

Die wesentlichen ersten Entwicklungsaufgaben werden die Entwicklung von Methoden zur Abschätzung eines Anfangsporenwasseranteils sowie die Entwicklung eines Konsolidierungsmodells zur Modellierung der Porenwasserdynamik sein.

Die Modellierung des Porenwasserzustandes und seiner Dynamik wird damit ein langfristiger und wesentlicher Bestandteil der SediMorph-Entwicklung sein.

4.3 Seegang und Wellen

Um die Morphodynamik der Küstengewässer naturähnlich zu simulieren, ist der Einfluss des Seegangs zu berücksichtigen. Eine mittelfristige Aufgabe ist somit die Entwicklung einer physikalischen Schnittstelle zu Seegangs- oder Wellenmodellen.

Die effektive d. h. morphologisch wirksame Sohlschubspannung kann hier nicht über die Berechnung einer Sohlschubspannung aus der mittleren Strömungsgeschwindigkeit und der zugeordneten Wassertiefe berechnet werden. Hier müssen die Sohlbelastungen aus den Ergebnisgrößen eines Seegangmodells, wie z. B. im idealsten Fall des Seegangrichtungsspektrums entwickelt werden.

4.4 Bodenmechanik

In der weiteren Entwicklung sollen in SediMorph die statischen und dynamischen Gleichungen der Kontinuumsmechanik implementiert werden. Hierdurch werden Hangstabilität bzw. Rutschungen und Hanggleitungen berechenbar. Werden ferner rheologische Gesetzmäßigkeiten erfasst, kann SediMorph auch zu einem Fluid-Mud-Transportmodell weiterentwickelt werden.

Literatur

Putzar, B. (2003): Prognose von Dünenstrecken mit Tidekennwerten. Studienarbeit, Technische Universität Hamburg-Harburg. <http://www.hamburg.baw.de/hnm/nummeth/Putzar.pdf>.

Schneider, A.-K. (2003): Anwendungen von Gis-Verfahren zur Nutzung topographischer und sedimentologischer Informationen für das Küstenmanagement. Diplomarbeit, Fachhochschule Koblenz. <http://www.hamburg.baw.de/hnm/nummeth/Schneider.pdf>.

Sendzik, W. (2003): Fraktionierung von Geschiebetransportraten in morphodynamisch-numerischen Modellen. Master's thesis, Technische Universität Hamburg-Harburg. <http://www.hamburg.baw.de/hnm/nummeth/Sendzik.pdf>

Seegangmodellierung in der BAW

DR.-ING. ULRICH VIERFUSS, BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, DIENSTSTELLE HAMBURG, REFERAT ÄSTUARSYSTEME I

Seegangmodelle werden in der BAW betrieben, um durch Ausbauvorhaben bedingte seegangsklimatische Veränderungen zu prognostizieren und um Grundlagen für die Berechnung von Bauwerksbelastungen zu ermitteln.

Beispiele für Ausbauntersuchungen

Bei der Beurteilung der morphodynamischen Auswirkungen des **Hafenbauprojekts „JadeWeserPort“** war der Seegang zu berücksichtigen (Bild 1). Die Baumaßnahme umfasst die Aufschüttung einer bisherigen Wasserfläche und die Vertiefung von Fahrrinnen- und Zufahrtbereichen. Dies hat für die Ausbreitung des Seegangs grundsätzlich folgende Auswirkungen:

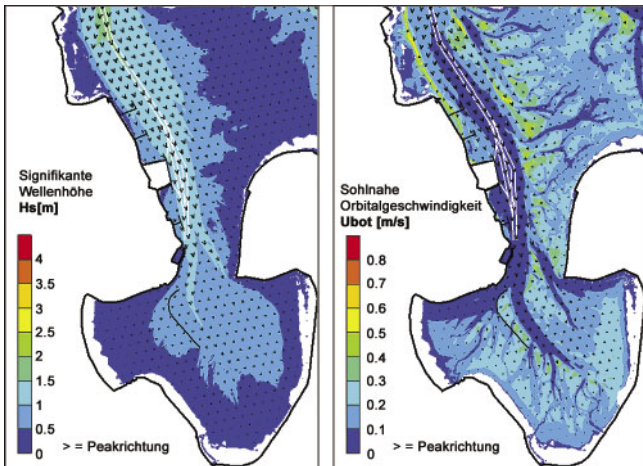


Bild 1: Berechnungsergebnis für die Verteilung der signifikanten Wellenhöhen (links) und der sohnahen Orbitalgeschwindigkeiten (rechts)

- Die neue Terminalfläche unterbricht bisherige Möglichkeiten der Seegangausbreitung. Es entstehen seegangsberuhigte Leegebiete.
- Die durch Wellen beaufschlagten Ufer, insbesondere die senkrechten Kajen, reflektieren Seegangenergie. Dadurch steigen die Wellenhöhen bereichsweise an.
- Die Vertiefungen vermindern die Wirkung der Sohlreibung. Shoaling-Effekte und refraktionsbedingte Wellenumformung werden verändert.
- Darüber hinaus ist zu beachten, dass die Seegangausbreitung und –umformung durch die Tideströmung beeinflusst wird. Da der JadeWeserPort örtlich zu Veränderungen der Strömungsgeschwindigkeiten führt, sind ausbaubedingte Änderungen auch durch strömungsabhängige Prozesse der Seegangausbreitung möglich.

Für die Seegangmodellierung wurde das spektrale Seegangmodell „SWAN“ (TU Delft) verwendet, welches die genannten physikalischen Effekte beinhaltet. Zur Beurteilung der morphologischen Wirkung genügt in diesem Fall die Bewertung der ausbaubedingten Veränderungen der sohnahen Orbitalgeschwindigkeiten.

Das WSA Stralsund plante, ein Sandfangbecken an der **Hafeneinfahrt Warnemünde** anzulegen, welches den direkten Eintrieb des in west-östlicher Richtung transportierten Sandes in die Fahrrinne verhindert und die Unterhaltung der Fahrrinne erleichtert (weniger häufige, örtlich konzentrierte Baggerungen). Die BAW war zu einer Stellungnahme aufgefordert, ob der geplante Sandfang die Schutzwirkung des Molensystems beeinträchtigen und die Seegangsverhältnisse im Hafenbereich verschlechtern kann.

Die Vertiefung im Bereich des Molenkopfes (Sandfang) beeinflusst im Wesentlichen die Refraktion der Wellen. Um dies kurzfristig beurteilen zu können, wurde ein numerisches Wellenstrahlenmodell erstellt, das die Refraktionswirkungen berechnen und veranschaulichen kann (Bild 2). Das in Zusammenarbeit mit dem GKSS-Forschungszentrum entwickelte System WARM (Wave Ray Model) bildete dafür die Grundlage.

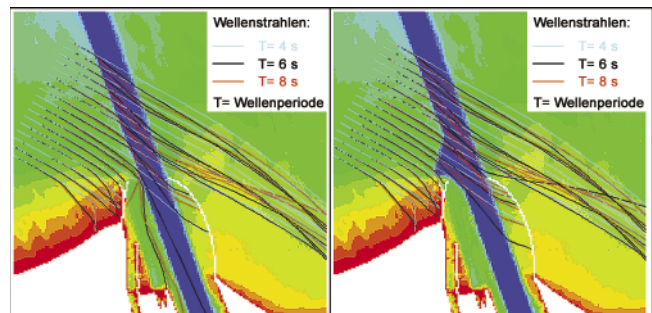


Bild 2: Berechnung der Wellenstrahlen ohne und mit Sandfangbecken. In der gezeigten Situation wird der Seegang im Hafen sogar reduziert.

Beispiel für Bauwerksuntersuchungen

Helgoland ist als küstenfernste deutsche Insel den Naturgewalten in besonderem Maße ausgesetzt. Die Liegeplätze im **Schutz- und Sicherheitshafen Helgoland** und das Südhafengelände werden durch einen äußeren Molenring gegen den Seegang abgeschirmt. Dieser Ring besteht aus bis zu rd. 90 Jahre alten Bau-

werken, deren Bemessungsgrundlagen für die Bauwerksprüfung und evtl. Instandsetzungsmaßnahmen nicht mehr ausreichten und deshalb mit den heute verfügbaren Methoden neu zu ermitteln waren.

Im Auftrag des WSA Tönning waren somit die maßgebenden Seegangparameter für Standsicherheitsnachweise der äußeren Molen- und Uferbauwerke des Schutz- und Sicherheitshafens zu ermitteln. In diesem Rahmen wurden folgende Arbeiten durchgeführt:

- Seegangshindcast über eine Dauer von 40 Jahren: Erstellung eines Seegangmodells der Nordsee und Berechnung des Seegangsklimas in der Deutschen Bucht. Dieser Auftrag wurde an das GKSS-Forschungszentrum Geesthacht vergeben.
- Auswertung der Daten für das Helgoländer Seegebiet: Durch die Hindcast-Rechnungen stand für das Seegebiet erstmals ein umfangreicher, homogener Datensatz zur Verfügung. Er konnte nach Seegangsrichtungen getrennt statistisch ausgewertet werden und ermöglichte so die Festlegung von Bemessungsparametern für verschiedene Eintrittswahrscheinlichkeiten.
- Modellierung der küstennahen Seegangsumformung im Helgoländer Seegebiet mit feiner Auflösung. Hier wurden die zuvor ermittelten Bemessungsparameter eingesteuert und die Veränderung des Seegangs bis zum Erreichen der Molenbauwerke modelliert, also die bemessungsrelevanten Seegangparameter ermittelt (Bild 3). Diese Berechnungen wurden mit dem spektralen Seegangmodell SWAN (TU Delft) durchgeführt.

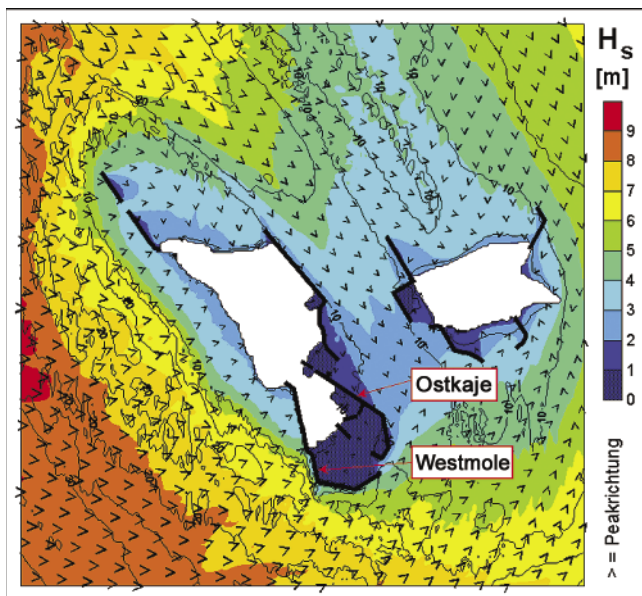


Bild 3: Modellierung der küstennahen Seegangsumformung (innerer Bereich des Modells mit 20 m Topographie-Auflösung)

- Berechnung der Standsicherheiten der Molenbauwerke: Erste Standsicherheitsrechnungen wurden durchgeführt und Sanierungskonzepte vorgeschlagen. Die bauwerksnahen Seegangparameter und die Berechnungsansätze wurden so aufbereitet, dass der Auftraggeber weitergehende Analysen selbst durchführen kann.

Ausblick

Die morphodynamischen Prozesse in den äußeren Bereichen der Ästuar sind wesentlich durch Seegang beeinflusst. Die Wirkungen neuer Maßnahmen an Seeschiffsstraßen werden (auch durch begleitende Strombaumaßnahmen) immer geringer und sind mit immer größerer Genauigkeit zu ermitteln.

Damit gewinnt auch der Seegang bei der Beurteilung ausbaubedingter morphodynamischer Entwicklungen zunehmend an Bedeutung. Dies hat wichtige Konsequenzen für die Seegangmodellierung in der Dienststelle Hamburg. Während es bisher möglich war, den Seegang getrennt von den Tidenströmungen zu behandeln (JadeWeserPort und letzte Ausbaumaßnahmen an Elbe und Weser) wird dies in Zukunft wahrscheinlich nicht mehr ausreichen.

Auch bei der Optimierung von Unterhaltungskonzepten müssen ggf. Seegangseinflüsse beachtet werden.

Die physikalischen Prozesse infolge der Tide und infolge des Seegangs werden also gemeinsam (d. h. in der sich überlagernden Wirkung und in ihrer Interaktion) zu betrachten sein, sodass gekoppelte Modelle zu entwickeln und zu betreiben sind. Diese Erkenntnis hat zu einer neuen Kooperation mit der GKSS geführt. Dabei wird das „K-Modell“ der GKSS so weiterentwickelt, dass es zukünftig auf unstrukturierten Gittern rechnen und als zusätzliches Modul der UnTrim-Modelle arbeiten kann.