

3D- STRÖMUNGEN UND SEDIMENTTRANSPORT IN TIDE- UND BRACKWASSERBEEINFLUSSTEN HÄFEN

von

Oliver Stoschek¹
Jan Geils²
Andreas Matheja³
Claus Zimmermann⁴

ABSTRACT

Modelling of currents and sediment transport in a tidal environment are most relevant for the design of harbours and harbour maintenance. Influencing currents and the sediment transport from alignment and specific structures can lead to a reduction of sedimentation in harbours. Even limited reductions can reduce dredging costs and in case of contamination also save costs for deposition or processing of harbour sediments.

Numerical models were set up for the Ems- and the Weser estuary to simulate currents and the sediment transport in a brackish and tidal environment. The main focus is on currents in and in front of the harbour entrances to the Große Seeschleuse (Emden) and the Nordschleuse (Bremerhaven). The complex currents in the harbours are visualised, the water exchange is determined and the sedimentation in the harbour is shown. It is also shown, that the quality of the boundary conditions determine for the quality of the results of a numerical model.

¹ Dipl.-Ing., FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

² Dipl.-Ing., FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

³ Dr.-Ing., FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

⁴ Prof. Dr.-Ing., FRANZIUS-INSTITUT FÜR WASSERBAU UND KÜSTENINGENIEURWESEN DER UNIVERSITÄT HANNOVER, Nienburger Straße 4, 30167 Hannover

1. EINLEITUNG

Das Vorhalten von Mindestwassertiefen stellt für Häfen an Tideflüssen eine der größten finanziellen Belastungen dar. Vorrangig die Ablagerungen kohäsiver Sedimente müssen durch aufwändige Unterhaltungsbaggerungen beseitigt werden, damit die Sicherheit und Leichtigkeit des Schiffsverkehrs gewährleistet bleibt.

Die Sedimentation in den Häfen als Ursache der notwendigen Baggerungen kann durch eine optimierte Gestaltung der Hafenbecken und deren Einfahrtsbereiche teilweise entgegengewirkt werden. Um die Sedimentationsmengen in den Häfen mit einem optimierten Einfahrtsbereich nachhaltig reduzieren zu können, sind detaillierte Untersuchungen der durch Tide- und Brackwasser variabler Dichte induzierten dreidimensionalen Strömungen notwendig.

Mit Hilfe des hydrodynamisch-numerischen 3D-Modells MIKE3-HD und dem dazugehörigen Sedimenttransportmodell (Mud Transport) vom DHI (DANISH HYDRAULIC INSTITUTE) werden die Strömungen und der Sedimenttransport im Bereich der großen Seeschleuse in Emden und des Vorhafens zur Nordschleuse in Bremerhaven berechnet und visualisiert. Diese Modelle decken die Ems- und Wesermündung ab und werden an Naturmessungen kalibriert.

2. HYDRODYNAMISCHE 3D-BERECHNUNGEN DES DOLLATS/EMS UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VARIIERENDER SALZGEHALTE

Zur Beschreibung der Strömungs- und Sedimentationsvorgänge im Emdener Vorhafen wurde ein umgebendes Regionalmodell (Abb. 1) aufgebaut, um die Strömungsverhältnisse in ihrer regionalen Ausdehnung bei variierenden hydrologischen Randbedingungen zu untersuchen und den Einfluss des Dollarts auf die Hydrodynamik des Ästuars beurteilen zu können.

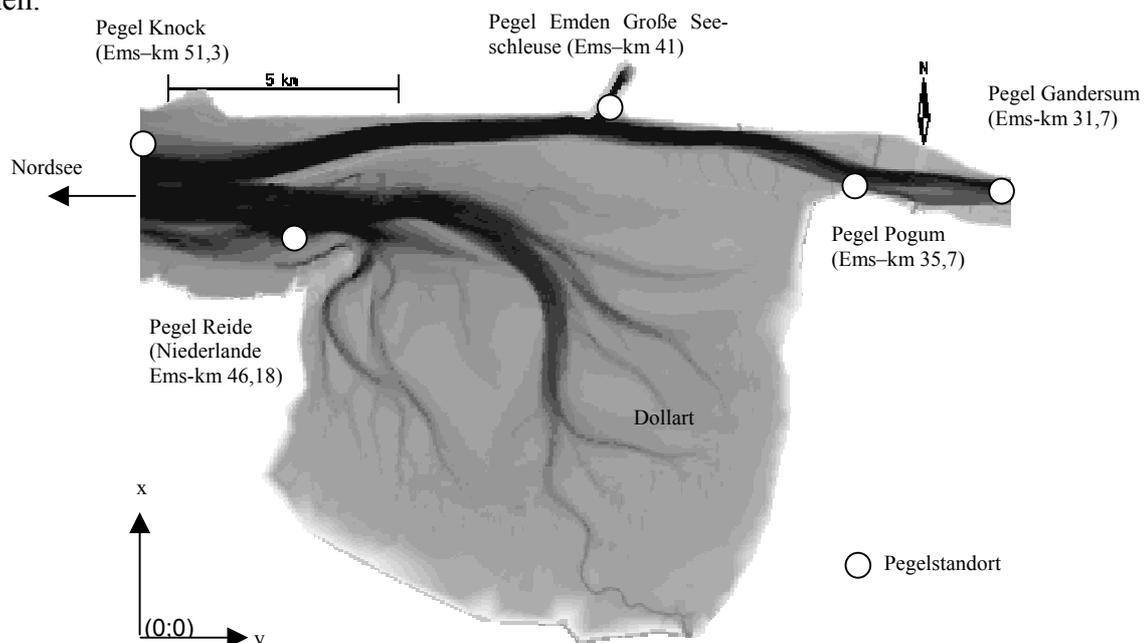


Abb. 1: Modellgebiet Ems/Dollart

Das hydrodynamische Regionalmodell umfasst den Bereich der Ems von Gandersum (Ems-km 32) bis Knock (Ems-km 51) einschließlich Dollart mit einer Modelloberfläche von rd. 132 km² (bei der Berechnung berücksichtigte Fläche). Es wurde eine Gitter-Auflösung von Δx bzw. $\Delta y=45\text{m}$ für das Regionalmodell gewählt, was 417 Zellen in x-Richtung bzw. 285 Zellen in y-Richtung entspricht.

Zur Kalibrierung (Zeitraum: Mai 1996) des Regionalmodells dienen die Pegelaufzeichnungen in Pogum (Ems-km 40,60), Emden (Ems-km 35,70) und Reide (Ems-km 46,18) und Strömungsmessungen in der Ems (Strömungsgeschwindigkeiten in Betrag und Richtung). Als Randbedingungen dienen die Wasserstände der Pegel Gandersum (obere Modellgrenze) und Knock (untere Modellgrenze). Für die 3-D Berechnungen wurden neben den Tidewasserständen auch über die Zeit variable gemessene Salzgehalte an den offenen Modellrändern in Knock und Gandersum eingesteuert.

Die Kalibrierung des hydrodynamischen Modells im Hinblick auf einen natürlichen Tideablauf erfolgte, mangels Durchflussmessungen an einer der Modellgrenzen, nur nach Tidewasserständen (Abb. 2), den Eintrittszeiten der Scheitelwerte der Tiden und dem Vergleich der gemessenen Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen.

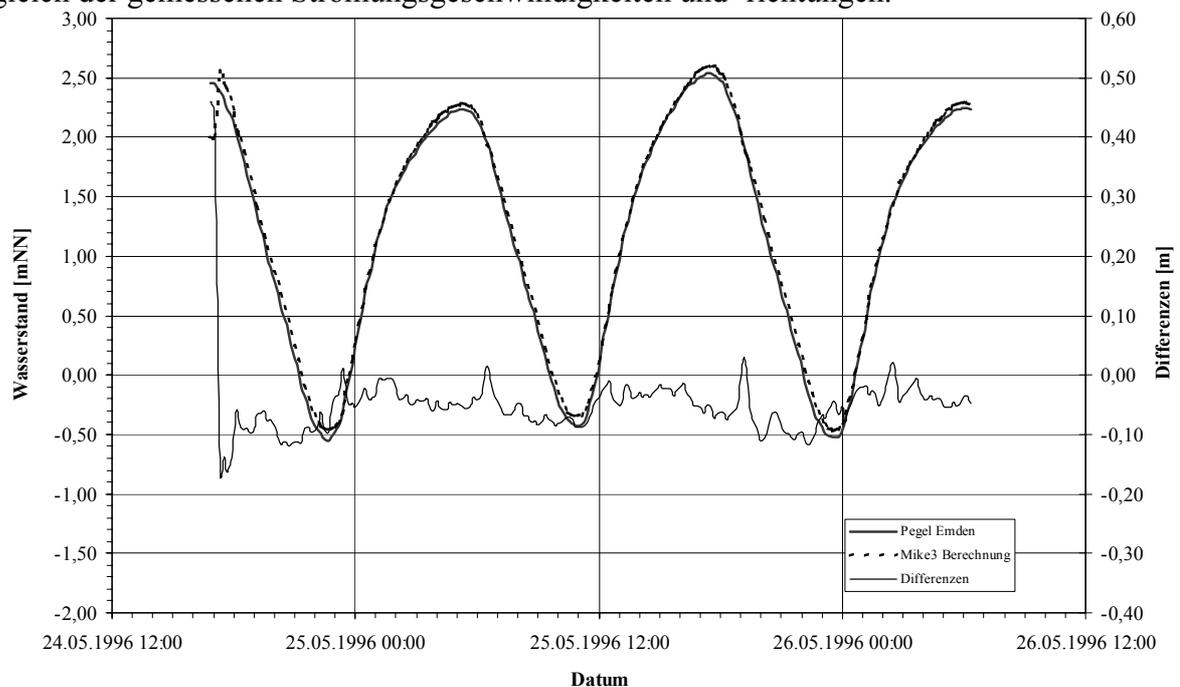


Abb. 2: Gemessene (WSA EMDEN) und berechnete Wasserstände am Pegel „Emden Große Seeschleuse“ im Kalibrierungszeitraum Mai 1996

Abweichungen bis zu 11 cm zwischen gemessenen und berechneten Tidewasserständen lassen sich im Bereich der steil abfallenden Ebbeäste sowie bei Thw und Tnw erkennen, was auf den fehlenden Impulseintrag in das Modellgebiet aufgrund von 2 Wasserstand-Randbedingungen zurückzuführen sein dürfte.

Für die Kalibrierung des Modells standen neben den Pegelaufzeichnungen Strömungsmessungen im Zentrum des Modells im Bereich des Emders Fahrwassers zur Verfügung (Messungen wurden vom WSA-EMDEN durchgeführt). Die zur Kalibrierung verwendeten Punktmessungen erforderten detaillierte Angaben in Bezug auf die Lage (Gauß-Krüger Po-

sition) und Tiefe (Höhe über Sohle) der Messgeräte. Der Vergleich zwischen gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen ist in Abb. 3 dargestellt. Im Mittel betragen die Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Strömungsgeschwindigkeiten 0,1 m/s. Die Charakteristika der Tideströmungen werden allerdings mit dem numerischen Modell naturnah simuliert. So zeigen sowohl die Simulationsergebnisse als auch die Messungen höhere absolute Flutstromgeschwindigkeiten, während die maximalen Ebbestromgeschwindigkeiten von längerer Dauer sind.

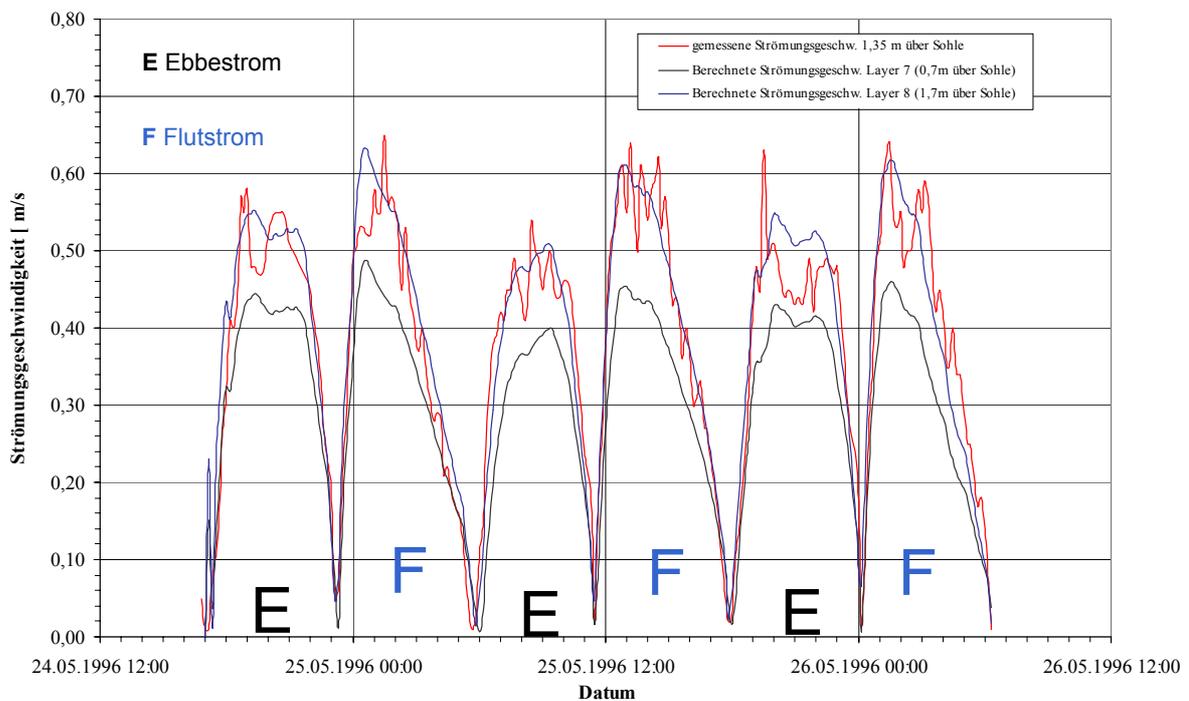


Abb. 3.: Gemessene (WSA EMDEN) und berechnete Strömungsgeschwindigkeiten im Fahrwasser der Ems auf Höhe des Emders Vorhafens (Ems-km 41)

Neben der Kalibrierung (Anpassung der Turbulenzparameter) der Wasserstände und Strömungsgeschwindigkeiten ist eine Betrachtung der Salzgehaltsverteilung und ihre tide- bzw. zeitabhängige Variation von Bedeutung. In Abb. 4 und 5 ist die berechnete Salzgehaltsverteilung im Fahrwasser der Ems im Bereich des Emders Vorhafens für 2 repräsentative Zustände im Längsschnitt (Ems km 39 bis 41) wiedergegeben. Es ist zu erkennen, dass während der Ebbe eine Schichtung mit Salzgehaltsgradienten über die Tiefe von bis zu 10 PSU (PracticalSalinityUnit) auftreten. Während der Flutphase kommt es besonders im Bereich des Vorhafens zu Dichteströmungen. An der Sohle strömt das salzhaltigere Meerwasser in den Hafen ein während nahe der Oberfläche das weniger salzhaltige Wasser ausströmt.

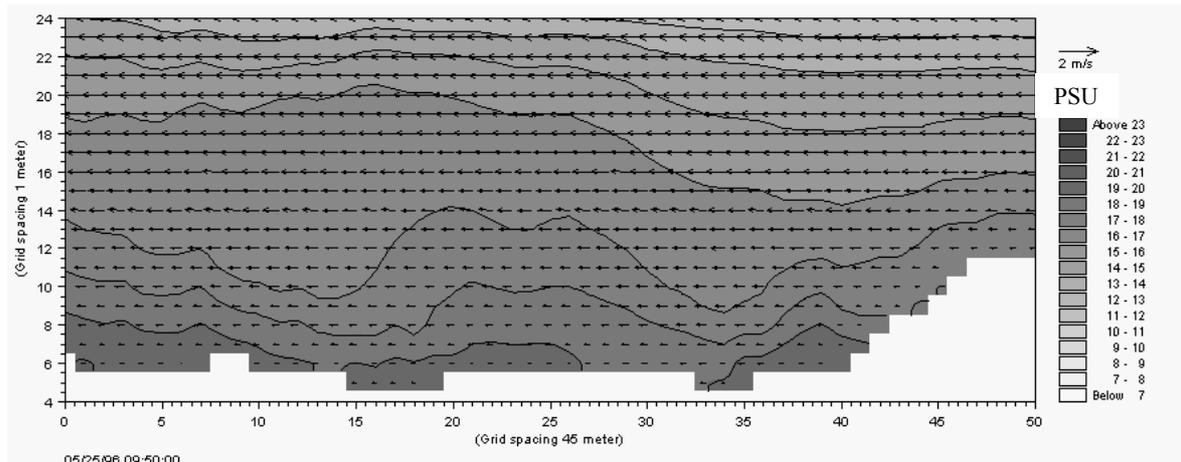


Abb. 4: Darstellung der Salzgehaltsverteilung im Bereich des Emders Vorhafens (Längsschnitt, Ems-km 39-41) während Ebbestrom

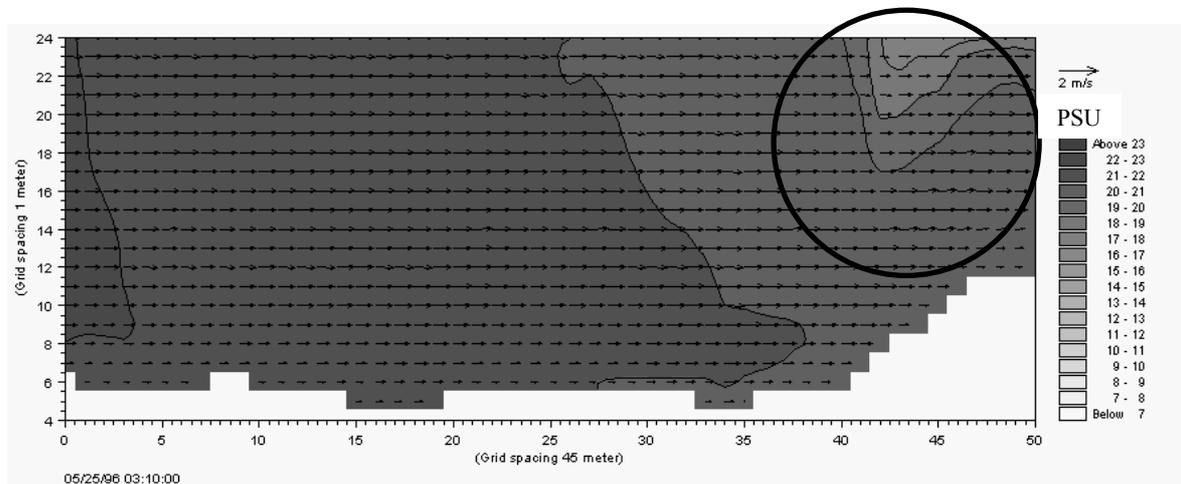


Abb. 5: Darstellung der Salzgehaltsverteilung im Bereich des Emders Vorhafens (Längsschnitt, Ems-km 39-41) während Flutstrom

3. HYDRODYNAMISCHE 3D-BERECHNUNGEN DER WESER UNTER BERÜCKSICHTIGUNG VARIIERENDER SALZGEHALTE

Für das Untersuchungsgebiet Bremerhaven wurde ein Regionalmodell mit einer Gitterauflösung von $\Delta x = \Delta y = 45$ m und $\Delta z = 1$ m aufgebaut (Abb. 6). Dieses Regionalmodell beginnt bei UW-km 53 (Dedesdorf) und endet bei UW-km 80 (Robbensüdsteert). Es dient der Beschreibung der Strömungs- und Sedimentationsvorgänge in ihrer regionalen Ausdehnung bei variierenden hydrologischen Randbedingungen im Bereich der Vorhäfen zur Nord- und Kaiserschleuse in Bremerhaven. In dieses Regionalmodell sind verfeinerte Gebiete mit einer Gitterauflösung bis zu $\Delta x = \Delta y = 5$ m integriert, um die Hydrodynamik im Vorhafen detailliert beschreiben zu können (Abb. 6).

Als Grundlage der Kalibrierung (Zeitraum: September 2000) dienten Pegelmessungen an den Modellrändern (Robbensüdsteert, seewärtiger Modellrand) und Nordenham / Brake (oberer Modellrand). Neben den Tidewasserständen wurden an den Modellrändern tideabhängige Salzgehalte eingesteuert.

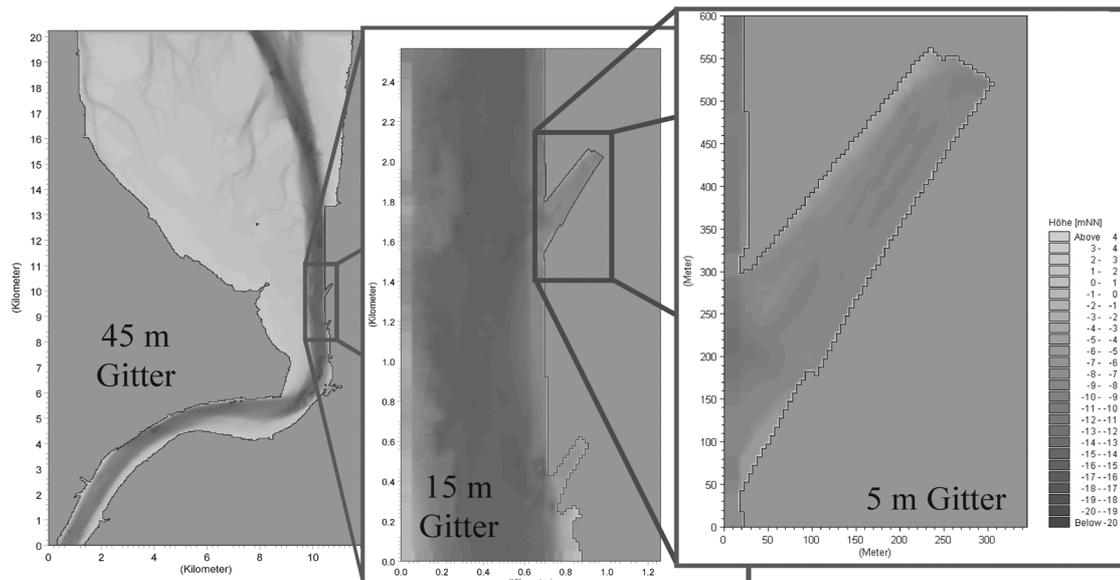


Abb. 6: Gewässertopographie des 3D-Regionalmodells der Weser und Lage der Verdichteten Bereiche (Datengrundlage WSA Bremerhaven, 1999/2000)

Die Kalibrierung des numerischen 3D-Modells erfolgte ebenfalls durch einen Vergleich mit Tidewasserständen und Eintrittszeiten der Scheitelwerte der Tiden. Zusätzlich sind ADCP-Strömungsgeschwindigkeiten und -richtungen im 3D-Raum zur Kalibrierung des Turbulenzmodells herangezogen worden.

In Abbildung 7 ist das Ergebnis der Wasserstandseichung für den Zeitraum (a) am Pegel Bremerhaven Alter Leuchtturm dargestellt. In den ersten beiden Tiden treten Wasserstandsunterschieden von bis zu 10 cm auf. Die weiteren Tiden werden mit einer Genauigkeit < 5 cm wiedergegeben. Durch den für das Modellgebiet konstant angenommenen Startsalzgehalt von 15 ‰ muss sich in der ersten Tide zunächst die natürliche Salzgehaltsverteilung im Modell einstellen.

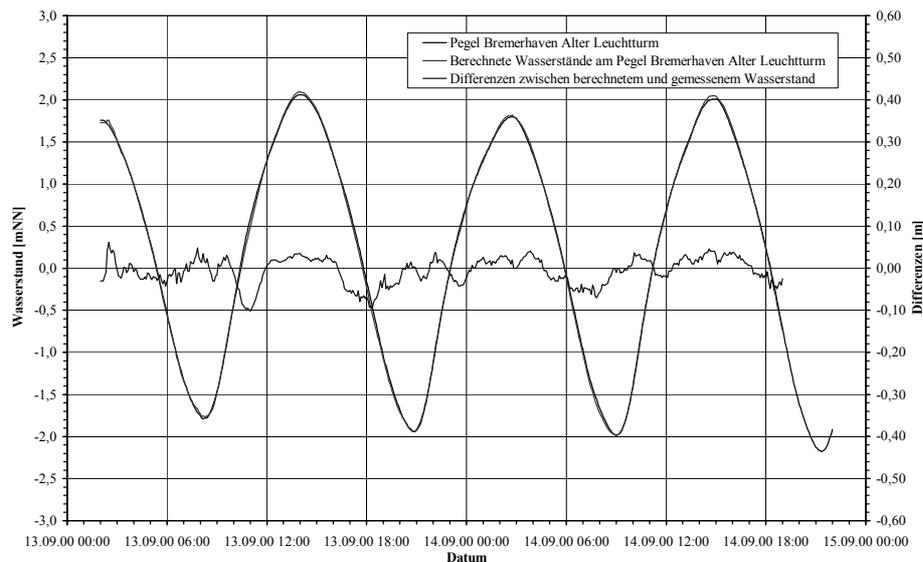


Abb. 7: Gemessene (WSA BREMERHAVEN) und berechnete Wasserstände am Pegel „Bremerhaven Alter Leuchtturm“ im Kalibrierungszeitraum (a) (13.09.2000 02⁰⁰ Uhr bis 14.09.2000 22⁰⁰ Uhr)

Anhand der durchgeführten ADCP-Messungen lassen sich sowohl die hydronumerischen Modelle kalibrieren. Besonders die im Einfahrtsbereich der Häfen vorherrschenden Dichteströmungen sind in den ADCP-Messungen gut erkennbar. Während ausgewählter Tidephasen kommt es im Einfahrtsquerschnitt zur Nordschleuse Bremerhaven über die Tiefe zu entgegengesetzten Strömungsrichtungen (Abb. 8 und Abb. 9).

4. SEDIMENTATIONEN IN DER EINFAHRT ZUR NORDSCHLEUSE IN BREMERHAVEN

Aufbauend auf die Hydrodynamik wurde mit Hilfe des Transportmodells Mike3-MT der Sedimenttransport im Bereich des Vorhafens zur Nordschleuse ermittelt. Das abgelagerte Sediment im Vorhafen zur Nordschleuse besteht überwiegend aus Mittel- bis Grobschluff mit Feinsandanteilen um 30%. Für die Modellierung wurde ein Korndurchmesser von $d_{50} = 10\mu\text{m}$ angesetzt. An den Modellrändern wurde zudem ein Sedimenteintrag von $c_s = 0,04 \text{ kg/m}^3$ in das Modellgebiet angesetzt.

In Abb. 10-1 ist die aus drei Tiden berechnete mittlere Sedimentationshöhe für eine Tide dargestellt. In den in Abb. 10-1 markierten Bereichen (a) bis (c) sind ebenso wie in Abb. 10-2 die höchsten Sedimentationshöhen zu erkennen. Die Sedimentationshöhen in der Berechnung liegen bei rd. 0,3 bis 0,7 cm/Tide. Punktuell sind Sedimentationshöhen über 1 cm/Tide zu finden.

Der Vergleich der Sedimentationshöhen und die Lage der Sedimentationsmaxima zwischen Modell und Natur ist aufgrund der komplexen anthropogenen Einflüsse auf die Sedimentablagerung nur eingeschränkt möglich. Diese Einflüsse sind aus den dargestellten Messungen nicht abzuschätzen, so dass die gemessenen Höhen nur als Richtwerte angesehen werden dürfen.

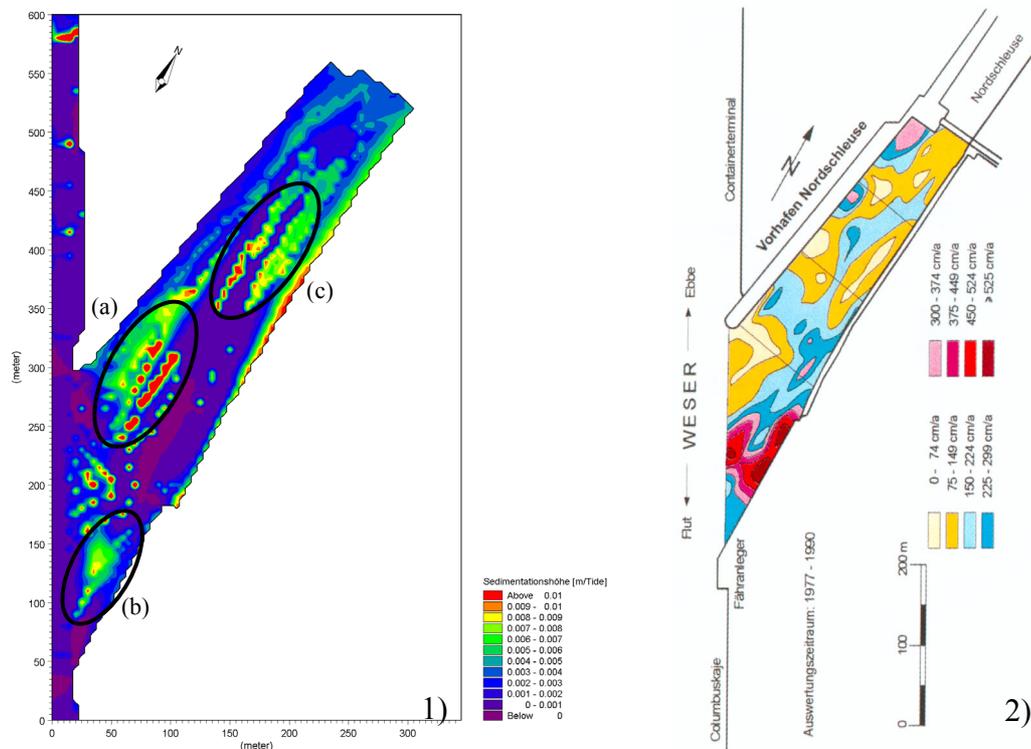


Abb. 10: 1) Berechnete Sedimentationshöhen im Vorhafen zur Nordschleuse; 2) Gemessene Sedimentationshöhen im Vorhafen zur Nordschleuse (NASNER, 1997)

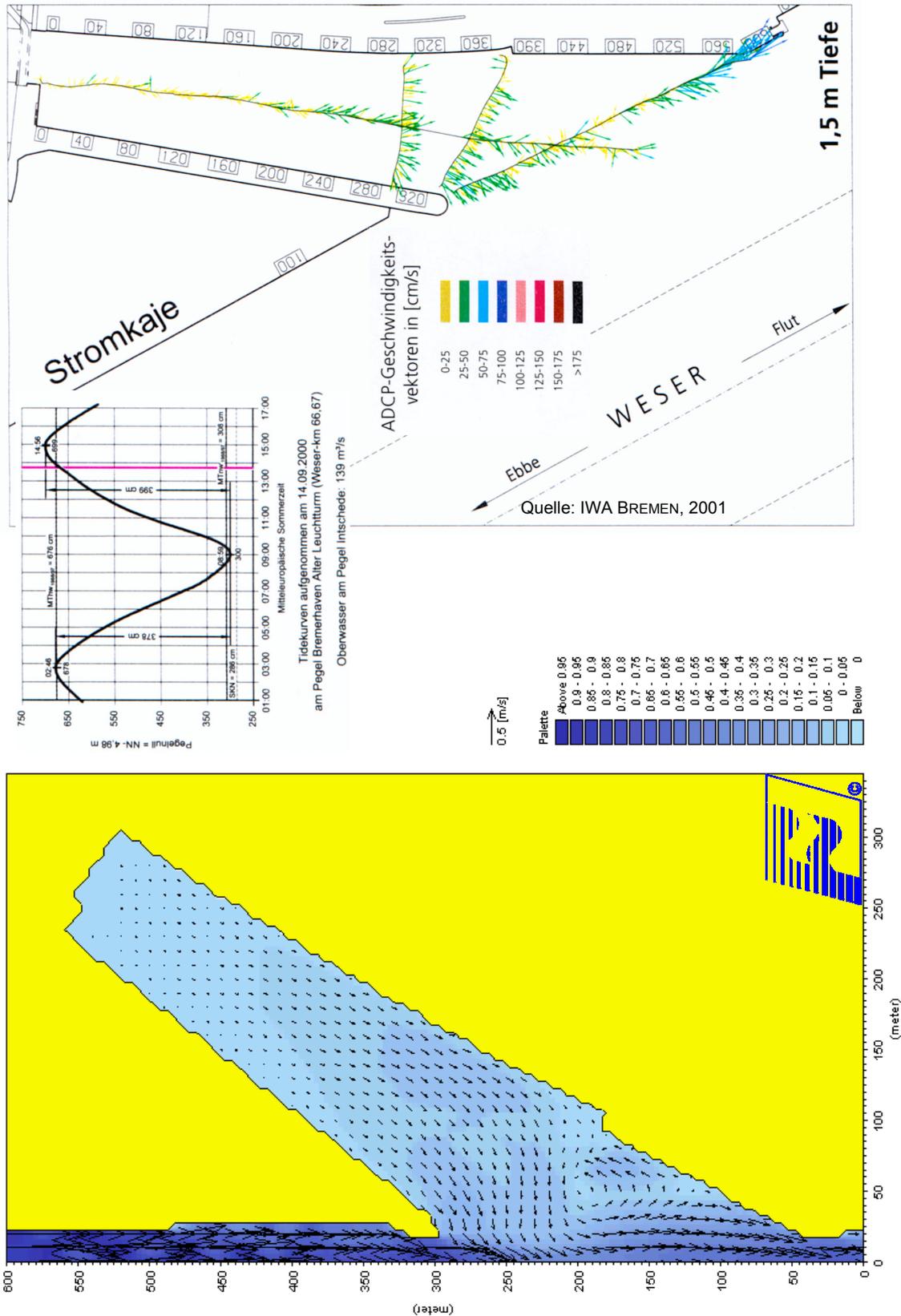


Abb. 8: Berechnete (unten) und gemessene (oben) oberflächennahe Strömungsverhältnisse (14.9.00, 13:45, 1 Stunde vor Thw) in der Einfahrt zur Nordschleuse Bremerhaven (1,5 m unter WSP)

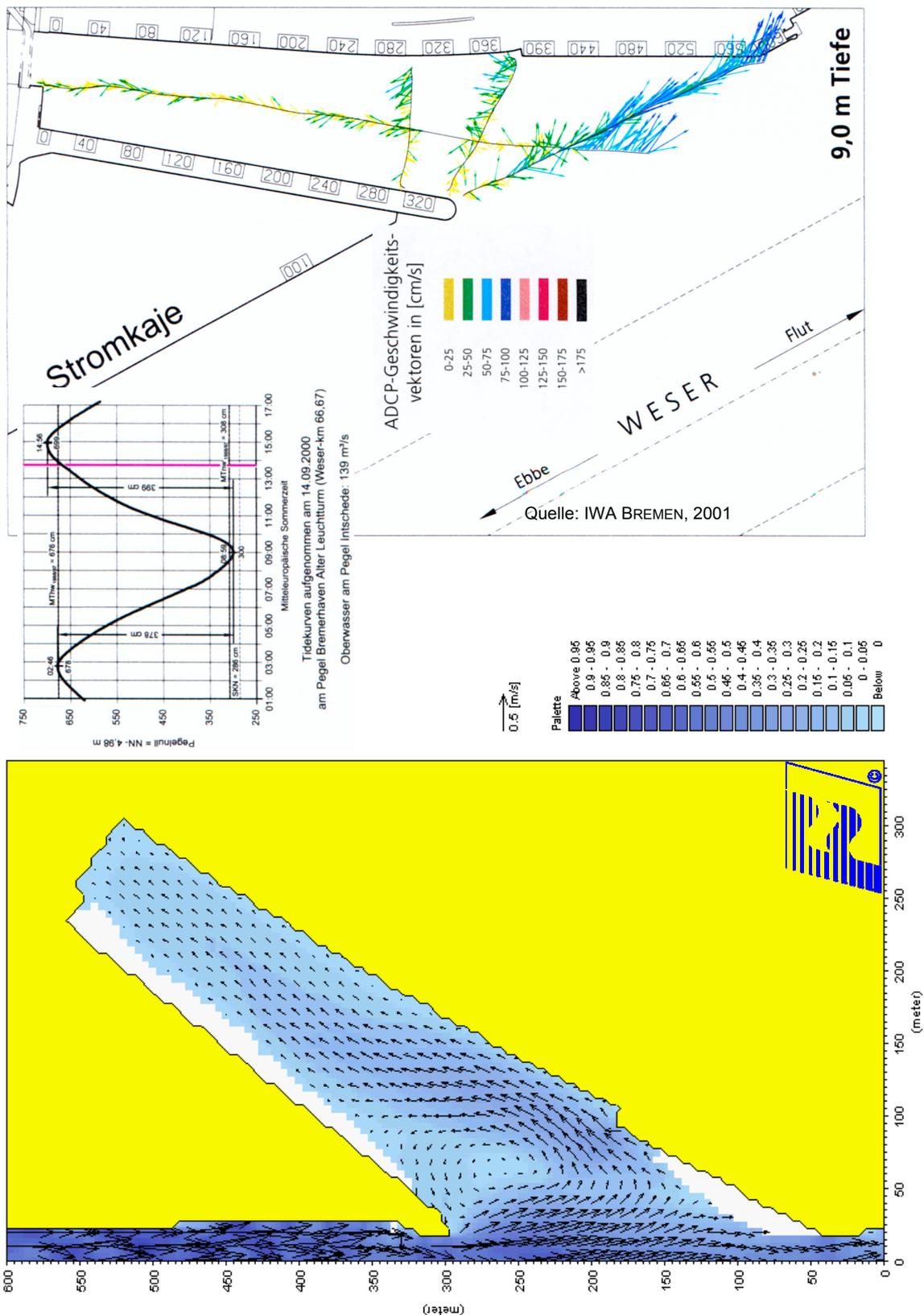


Abb. 9: Berechnete (unten) und gemessene (oben) sohnnahe Strömungsverhältnisse (14.9.00, 13:45, 1 Stunde vor Thw) in der Einfahrt zur Nordschleuse Bremerhaven (9 m unter WSP)

5. ERGEBNISSE

Der 3D-Modellbetrieb mit punktuellen Pegeldaten an den Modellrändern führt zu Ungenauigkeiten bei der Berechnung der Hydrodynamik und des Sedimenttransportes. Im Fallbeispiel Emden werden außerdem die Scheitelwerte der Tidekurve (Tnw und Thw) nicht vollständig erreicht. Diese Abweichungen resultieren in den 3-D Berechnungen neben der Vernachlässigung des Impulseintrages durch eine Wasserstandsrandbedingung am oberen Modellrand vorrangig aus den an den Messstellen nur punktuell gemessenen Salzkonzentrationen 1,5 m unter SKN. Sie geben nicht die maximalen Konzentrationen an der Sohle und die minimalen Konzentrationen an der Oberfläche wieder. Die Qualität der hydrodynamischen Ergebnisse ist, im Vergleich mit den ADCP-Messungen in Bremerhaven und den Dauerstrommessungen in Emden, ausreichend, um weitergehende Maßnahmen in Bereich der Hafeneinfahrt untersuchen zu können.

5. SCHRIFTTUM

- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU: Peildaten des Untersuchungsgebietes Dollart, Ems, Emden Hafen im 15 m Raster für den Zeitraum Mai/Juni 1996.
- INSTITUT FÜR WASSERBAU DER HOCHSCHULE BREMEN: Sedimentation in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen; Vorhaben: Hydrodynamische und morphologische Vorgänge in brackwasserbeeinflussten Vorhäfen – In situ Messungen. Zwischenbericht an das KFKI, 2001.
- INSTITUT FÜR WASSERBAU DER HOCHSCHULE BREMEN: Hydrodynamische und morphologische Vorgänge in Brackwasserhäfen – In situ Messungen. Tagungsband, 4.FZK-Kolloquium, Hanover, 2003.
- NASNER, H.: Sedimentation in Tidehäfen, Phase2. Die Küste, Heft 59, 1997.
- WASSER- UND SCHIFFFAHRTSAMT BREMERHAVEN: Peilungen in der Weser von UW-km 43 bis UW-km 90 und Peilungen der angrenzenden Wattgebiete der Außenweser aus dem Jahr 1999 und 2000.