

Einfluss des Schraubenstrahls aus Schifffahrt auf Sedimentresuspension und Sohlerosion

Dr. Oliver Stoschek
DHI-WASY GmbH, Syke

Dr. Elimar Precht
DHI-WASY GmbH, Syke

Dr. Ole Larsen
DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Mamta Jain (Ph. D.)
DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Lars Yde (ChEng)
DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Dipl.-Ing. Nino Ohle
HPA Hamburg Port Authority, Hamburg

Dipl.-Ing. Thomas Strotmann
HPA Hamburg Port Authority, Hamburg

Zusammenfassung und Ausblick

In der hier vorgestellten Studie wurden Naturmessungen, Labormessungen und unterschiedliche Methoden zur Modellierung Strömungen und Sedimenttransport verwendet, um den schiffsinduzierten Sedimenttransport im Hafen in Singapur und Hamburg sowie auch in der Elbe zu untersuchen. Hier konnte zunächst nur ein Überblick über die unterschiedlichen Ansätze und Ergebnisse gegeben werden. Zusammenfassend zeigt sich der größte Einfluss bei der Manöverfahrt in den jeweiligen Häfen. Aber auch die Revierfahrt kann eine der Ursachen für die Verschlickung von Seitenbereichen darstellen. Im Umfeld von Bereichen mit geringer Kielfreiheit kann es im Laufe eines Jahres zu merklichen schiffsinduzierten Sedimentumlagerungen kommen.

1. Einleitung

Voraussetzung für ein ausgewogenes Sedimentmanagement in Flussgebieten und Ästuaren ist neben vielen anderen Einflussgrößen - auch die Kenntnis der durch den Schiffsverkehr erhöhten Sedimentfracht sowie deren Wechselwirkungen mit der Hydrogeomorphologie und Ökologie.

Schwebstoffe und Sedimente inklusive ihrer abiotischen und biotischen Komponenten sind in diverse Prozesse im benthischen und pelagischen Bereich eingebunden. So kommt es in Bereichen mit geringerer Fließgeschwindigkeit zu verstärkter Sedimentation von Schwebstoffen und Sauerstoffzehrungsprozessen, die wiederum Organismen des Ökosystems beeinträchtigen können. Sedimentgebundene Nähr- und Schadstoffe werden durch Resuspension ins Pelagial freigesetzt und können so die Wasserqualität und den Lebensraum von biologischen Lebensgemeinschaften beeinflussen.

Die durch den Schiffsverkehr in einer Wasserstraße hervorgerufenen Einwirkungen auf die Gewässersohle und Ufer resultieren entweder direkt aus dem Propellerstrahl oder aber indirekt aus den Verdrängungsströ-

mungen und den schiffserzeugten Wellen. Ausführliche Zusammenstellungen zu Letzterem finden sich u.a. in ULICZKA UND KONDZIELLA (2006).

Empirisch-analytische Ansätze sind u. a. für die Ermittlung der erosiven Wirkung der Schiffsantriebe entwickelt worden (z.B. LAM et al. 2011). Sie erfordern jedoch weitere Absicherung durch Naturmessungen und/oder physikalische beziehungsweise numerische Modellversuche.

In der hier vorgestellten Studie werden erste Ergebnisse von Untersuchungen dargestellt, die zum Ziel hatten, mit Hilfe einer Literaturstudie, Naturmessungen, der Auswertung empirischer Ansätze, physikalischen Modellversuchen sowie numerischer Modellierung schiffsschraubenstrahlinduzierten Sedimenttransport in Abhängigkeit seiner Einflussgrößen zu quantifizieren. Hierbei sind sowohl CFD Modelle (OpenFOAM (OPEN-FOAM 2013) sowie großskalige Modelle (MIKEbyDHI (DHI 2013)) zum Einsatz gekommen. Im Folgenden wird die Schiffsschraube durchgehend als Propeller bezeichnet.

Die hier vorgestellten Untersuchungen wurden gefördert durch: Hamburg Port Authority (HPA), Maritime Port Authority (MPA) Singapur.

2. Empirische Beschreibungen des Propellerstrahls

Der Propellerstrahl eines Schiffes ist auf Grund der Vielzahl der Einflussgrößen und Prozesse (z. B. Kavitation, Turbulenz) ein sehr komplexes Phänomen (siehe auch Abbildung 1 im Labormaßstab). Eine empirische Betrachtung stellt daher immer einen vereinfachten Ansatz dar, gleichwohl können auf Basis der Axialmomententheorie von ALBERTSON et al. (1950) wertvolle Abschätzungen der Wichtigkeit der Einflussgrößen gewonnen werden. Existierende empirische Beschreibungen wurden verwandt, um in einer Sensitivitätsanalyse die Bedeutung der Einflussgrößen auf die Geschwindigkeiten des Propellerstrahls in Sohlhöhe zu quantifizieren. Untersucht wurden: Kielfreiheit, Propellerdurchmesser, Propellerumdrehungen, Schiffsgeschwindigkeit sowie der Ruderwinkel.

Die Sensitivitätsanalyse zeigte, dass die Veränderung der Schiffsgeschwindigkeit den größten Einfluss auf die Sohlgeschwindigkeiten hat, wobei der Beschleunigungsfall (hohe Propellerumdrehungen bei niedriger Geschwindigkeit) den größten Einfluss darstellt. Ein Ruder hat ebenfalls sehr große Auswirkungen, vor allem bei negativen Winkeln (steuerbord) bei rechtsdrehenden Propellern (Abb. 2). Ein Teil des Propellerstrahls wird bei beschränktem Fahrwasser direkt auf die Sohle gerichtet. Eine größere Kielfreiheit mindert diese Effekte deutlich ab.

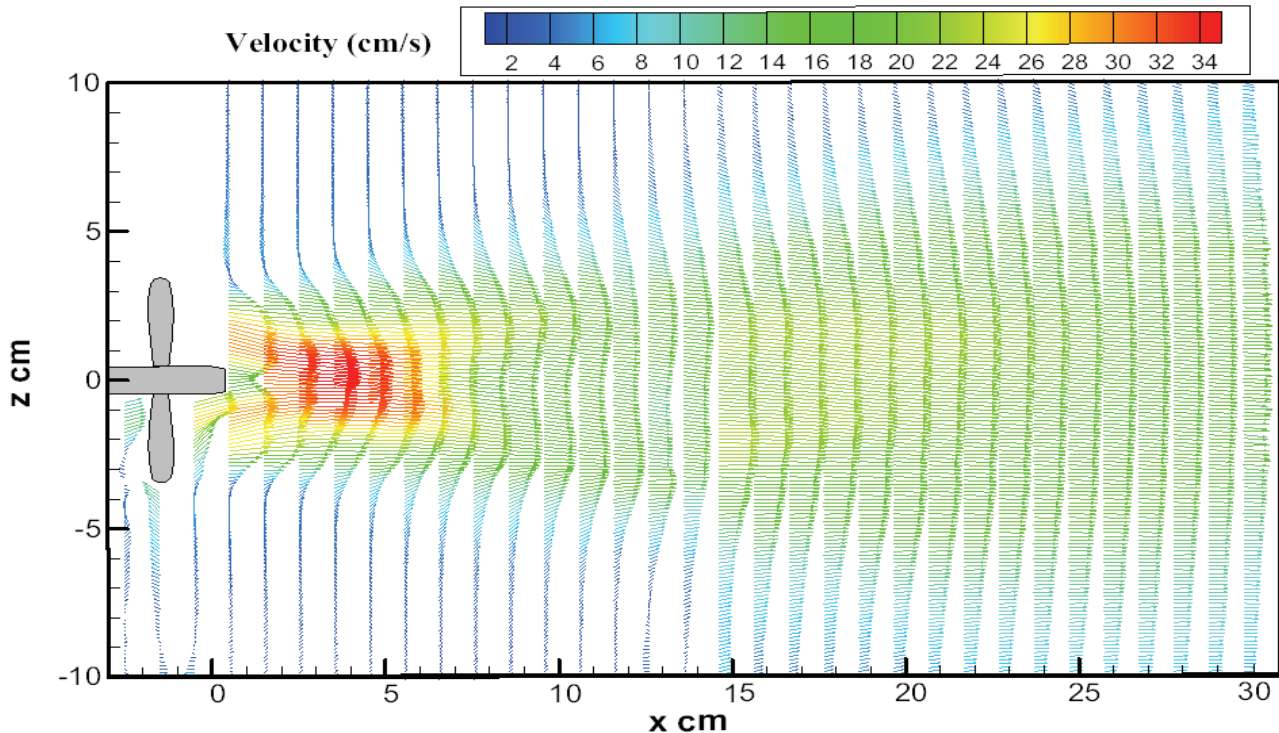


Abb. 1: Strömungsquerschnitt im Propellerstrahl gemessen im Labor mit Hilfe von Particle Image Velocimetry (PIV). Parameter: Propellerdurchmesser 7.5 cm, Nabendurchmesser 1.6 cm, Umdrehungen 500 min⁻¹. Versuch in den Laboren der Nanyang Technological University, Singapore.

3. CFD Modellierung

CFD-Simulationen wurden mit dem Programm OpenFOAM) durchgeführt. In den CFD Simulationen wurden zwei unterschiedliche Berechnungsansätze zur Beschreibung der Propeller und des von ihnen induzierten Strahles genutzt. Als Referenzszenario wurden Berechnungen mit dem Sliding Mesh Verfahren durchgeführt (s. auch Abbildung 2).

dem Sliding Mesh Model (GGI) ist der zu berechnende Bereich in zwei separate Gebiete unterteilt. In eines mit dem Rotornetz, welches dem Propeller folgt, und in eines mit einem Statornetz, welches den restlichen Modellbereich abbildet (Abb. 3). Als Referenzpropeller diente der gut beschriebene Wageningen B Propeller mit 5 Blättern.

Da direkte Messungen im Propellerstrahl nicht vorlagen, wurden zur Validierung Drehmoment und Schub verglichen.

Zur Berechnung der Szenarien zur Bedeutung der Einflussgrößen wurde das Multiple Reference Model genutzt, welches den besten Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenaufwand darstellte. Der Multiple References Ansatz (MRF) ist eine stationäre Formulierung, bei der der Rotor und der Stator im Bezug zu einander fixiert wurden und andere Bereiche im stationären und rotierenden Bereich zur Strahlerzeugung verwendet werden (Reference Frames, Impulsgleichung mit Coriolis- und Fliehkräften in Bezug zu einem sich selbst drehenden Bezugssystem). Die Abb. 4 zeigt den Vergleich mit dem validierten Sliding Mesh Modell.

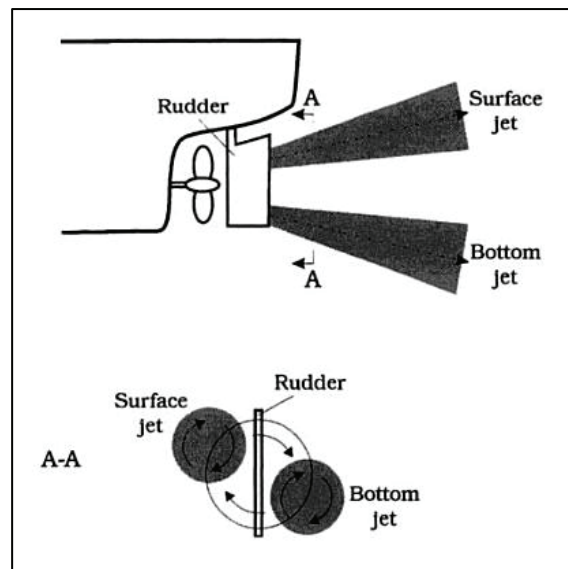


Abb. 2: Prinzipskizze der Aufteilung eines Propellerstrahls durch das Ruder (B. Mutlu, Sumer, J. Fredsoe, 2002)

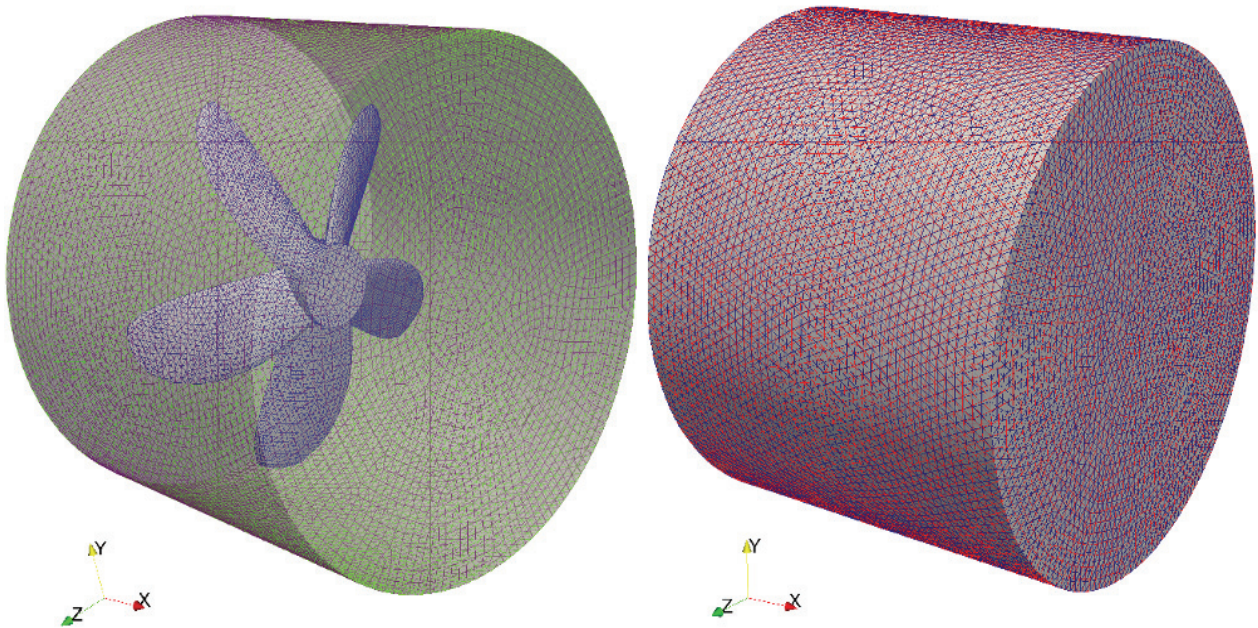


Abb. 3: Sliding Mesh Modell des Wageningen B Propellers. Durchmesser 8 m.

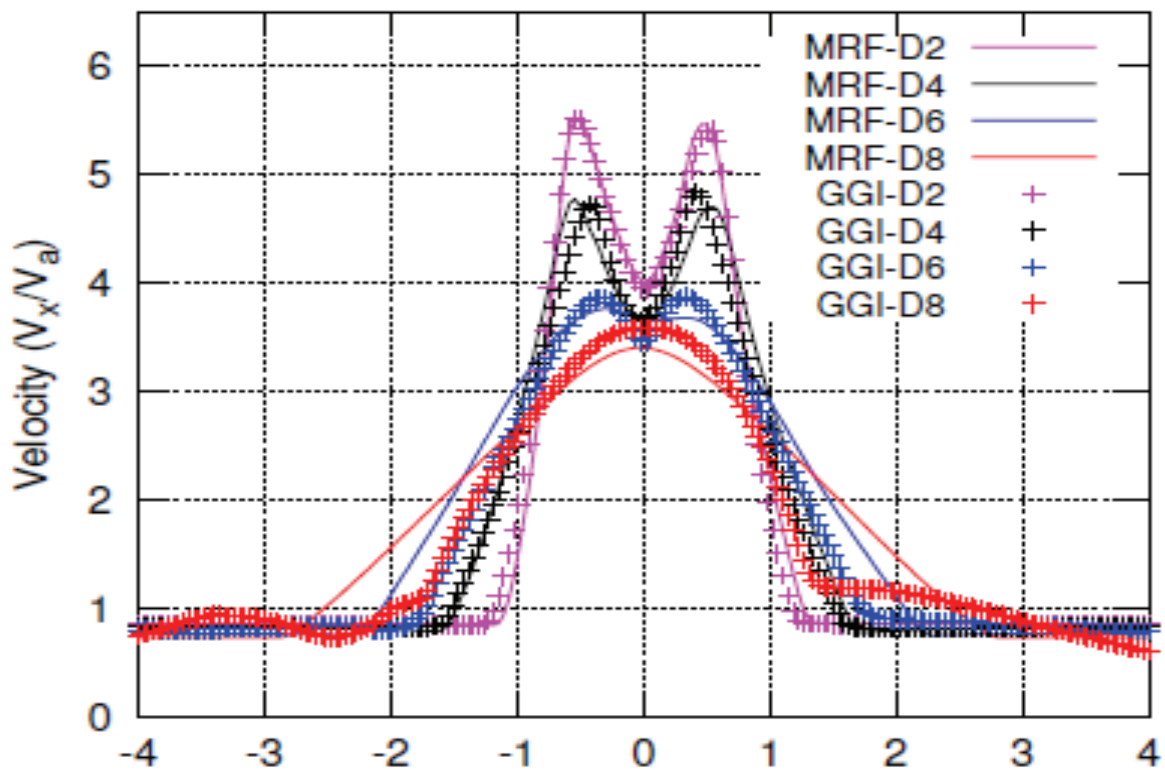


Abb. 4: Variation (longitudinale Geschwindigkeit geteilt durch die Propellergeschwindigkeit versus der radialen Distanz des Propellerstrahls geteilt durch den Propellerdurchmesser) der Geschwindigkeit hinter einem Propeller auf der Basis eines sliding mesh Modells (GGI) und eines MRF Modells. Ergebnisse in einer Entfernung von 2, 4 und 6 Propellerdurchmessern hinter dem Propeller

Mit diesem Modell wurden die weiteren Simulationen unter Verwendung der Geometrie des Rumpfes und des Propellers der Susanne Maersk durchgeführt (Abb. 5). Die Geometrie wurde freundlicherweise von Maersk A/S zur Verfügung gestellt. Die Susanne Maersk ist ein Containerschiff mit 347 m Länge, 42 m Breite, und 13.7 m Tiefgang sowie einer Kapazität von 6.600 TEU. Ihr Propeller ist 6-blättrig und hat einen Durchmesser von 9 m. Damit stellt die Susanne Maersk einen weltweit gängigen Schiffstyp dar. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Untersuchungsmatrix. Alle Berechnungen wurden mit einer nicht erodierbaren Sohle mit einer Rauigkeit von 1mm durchgeführt.

Die CFD Modellierung bestätigt die Ergebnisse aus Laborversuchen und empirischen Ansätzen und zeigt dass die propellerstrahlinduzierte Resuspension mit größerem Propellerdurchmesser D_p und Umdrehungszahl sowie geringerer Kielfreiheit und Schiffsgeschwindigkeit zunimmt. Weiterhin hat sich auch hier gezeigt, dass der Ruderwinkel einen erheblichen Einfluss hat. Insbesondere bei dem rechtsdrehenden Propeller und bei Steuerbordmanövern wird die Sohle stärker belastet.

4. Naturmessungen

Messungen des propellerinduzierten Sedimenttransports achteraus von außergewöhnlich großen Fahrzeugen (AGF) sind auf Grund von Sicherheitsbestimmungen und –erwägungen eine Herausforderung. Es wurden dennoch in Singapur sowie im Hamburger Hafen eine Vielzahl von ADCP Profilen gemessen, aus denen die Sedimentkonzentrationen im Fahrwasser ausgewertet werden konnte. Abbildung 7 zeigt eine dreidimensionale Darstellung von ADCP Schwebstoffkonzentrationsmessungen hinter einem Containerschiff am Tanjong Pagar Terminal in Singapur. Deutlich sind erhöhte Schwebstoffkonzentrationen zu erkennen. Abbildung 8 zeigt Ergebnisse von Messungen aus dem Hamburger Hafen, die von der HPA durchgeführt wurden. Die Schwebstoffkonzentration in dem gezeigten Fall überschritt 500 mg/l, in anderen Fällen wurden Schwebstoffkonzentrationen von über 1500 mg/l gemessen.

Parameter	Abkürzung	Einheit	Größen			
Kielfreiheit	UKC	m	1	3	5	∞
Propellerumdrehungen	RPM	Umdr/min	30	60	90	
Schiffsgeschwindigkeit	V	kn	0	6	12	
Rudderwinkel	Θ	°	-20	0	20	
Schiffsrumpf	-	-	Ja		Nein	
Propellerdurchmesser	D	m	9			
Propellertyp	-	-	Maersk S-Class			

Tabelle 1: Untersuchungsmatrix der CFD Szenariorechnungen

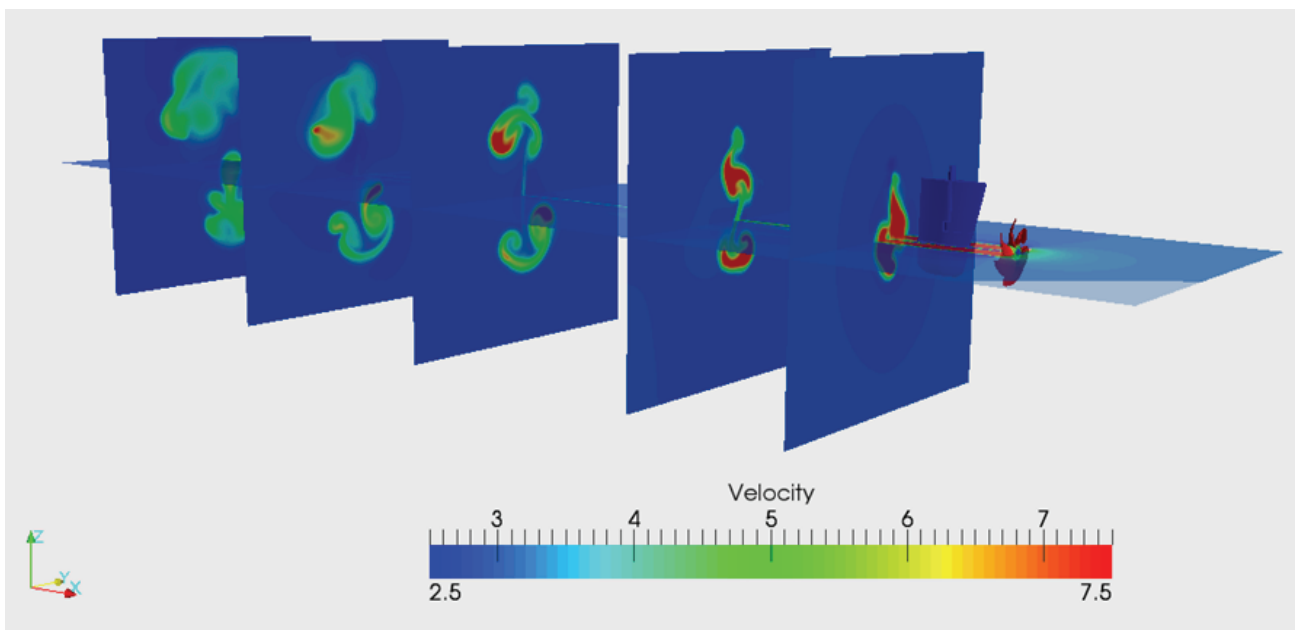
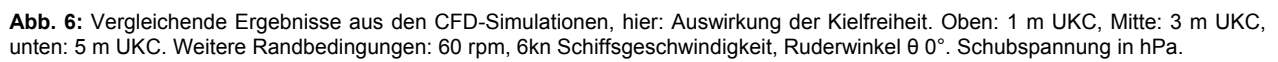


Abb. 5: Dreidimensionale Darstellung des Strömungsbildes im Propellerstrahl aus den CFD-Simulationen. Geschwindigkeit in m/s. Drehzahl= 60RPM, V=6 Knoten Wassertiefe=∞ und Ruderwinkel (theta)=0°



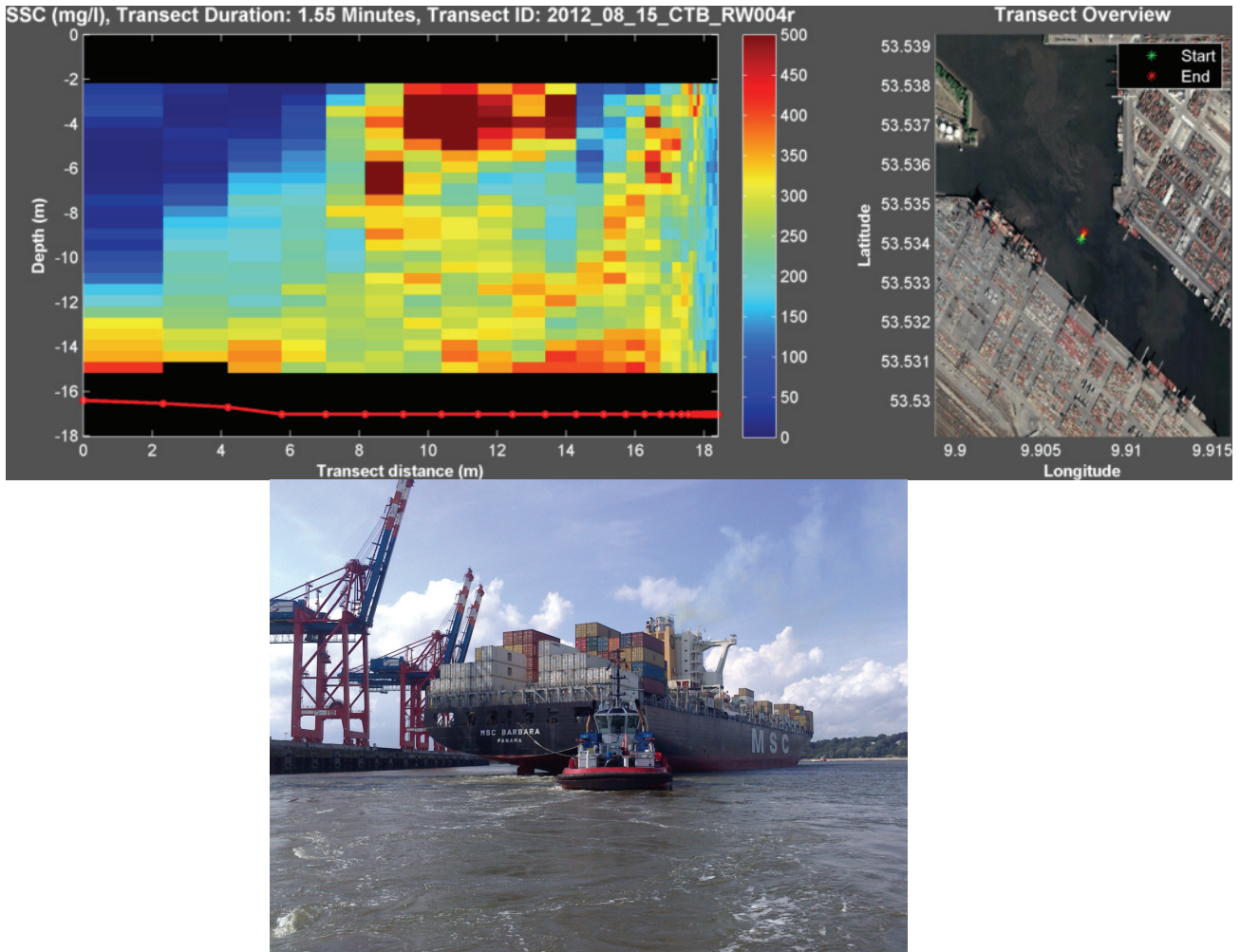


Abb. 8: Schwebstoffkonzentrationen hinter einem Containerschiff in Hamburg. Links Schwebstoffkonzentrationen, Mitte: Profilfrage, rechts: Ablegemanöver.

5. Großmaßstäbliche Modellierung

Während in CFD Simulationen nur Ausschnitte einzelner Schiffspassagen modelliert werden können, erfordert eine großmaßstäbliche Betrachtung der Auswirkungen des Schiffsverkehrs in seiner Gesamtheit andere Modellansätze.

Hierzu wurde ein dreidimensionales MIKE 3 Modell für die Tideelbe aufgebaut und mehrere Szenariofahrten zwischen Cuxhaven und Hamburg bei unterschiedlichen Tidezeitpunkten, sowie Manöverfahrten in Hamburg berechnet. Hierbei wurde das Sedimenttransportmodul MT und das Dredging Modul verwandt. Das Dredging Modul erlaubt die Erosion und Freisetzung einer Sedimentfracht über längere Strecken. Die Sedimentmengen wurden mit Hilfe der o.g. Messungen und eines vorgeschalteten Szenario Moduls berechnet. Das Modul berücksichtigt den Propellerdurchmesser D_p und Umdrehungszahl sowie die Kieflfreiheit und Schiffsgeschwindigkeit. Die Werte für die Manöverfahrten wurden direkt aus den Messungen übernommen. Die Szenarien umfassen verschiedene Liegeplätze, ankommende sowie abgehende Schiffe, unterschiedliche Tideverhältnisse und variable freigesetzte Schwebstoffkonzentrationen. Durch die Summierung werden die

Auswirkungen des Schiffsverkehrs in der Tideelbe erstmalig abgeschätzt, wobei nur die propellerinduzierten Sedimenttransporte betrachtet werden. Die Abb. 9 zeigt die Berechnung der Sedimentumlagerung bei einem Ablegemanöver am Containerterminal Altenwerder. Hierbei wurde nur die Fahrt in der Süderelbe bis in den Köhlbrand simuliert. Die gemessenen Konzentrationen während des Ablegemanövers betrugen bis zu 1500 mg/l. Dies wurde im Modell berücksichtigt, bis sich das Schiff in Fahrt setzt. Dann reduziert sich der Schwebstoffgehalt der Elbe unmittelbar hinter dem Schiff auf rund 15 mg/l. Hierbei zeigt sich direkt an der Kaje und im Bereich der Manöverfahrt zunächst eine deutliche Erosion. Nach dem Umlagern der Sedimente bleibt ein Bereich mit erhöhter Sedimentation zurück. Diese finalen Umlagerungen zeigen sich auch auf einigen Fächerecholotpeilungen der HPA, ohne dass sie einem bestimmten Schiff oder Manöver zugeordnet werden konnten.

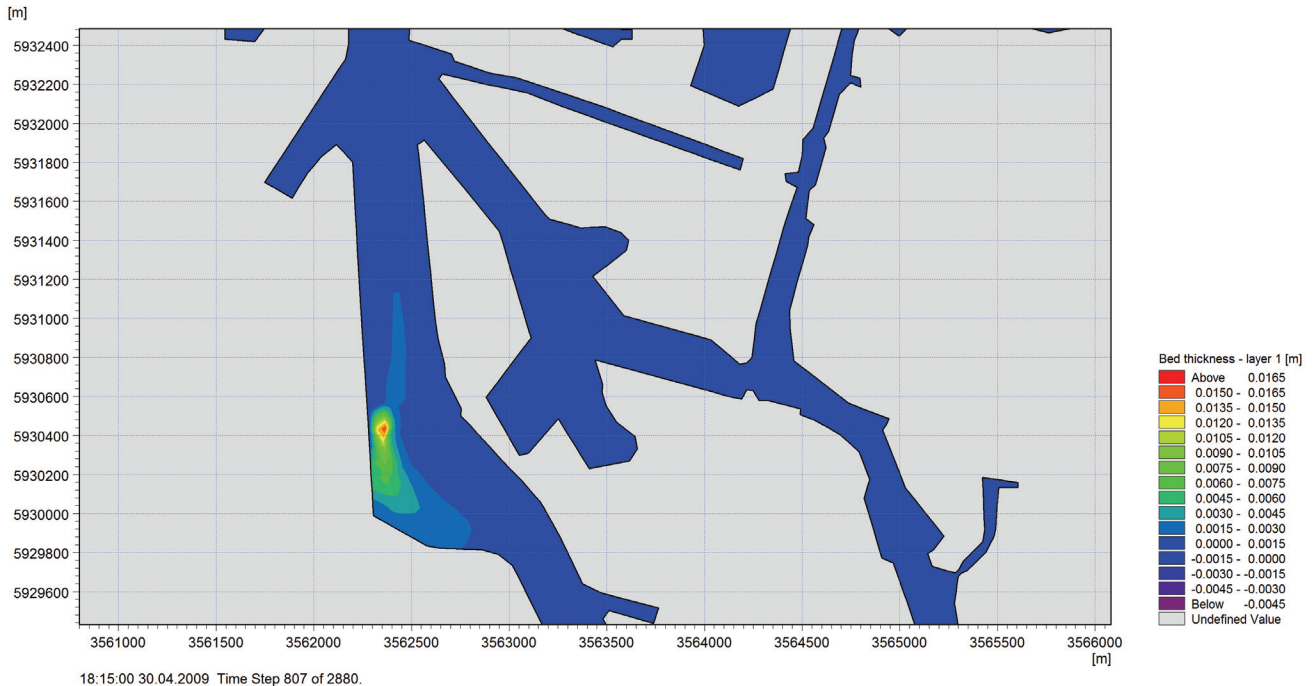


Abb. 9: Berechnete Sedimentumlagerung bei einem Ablegemanöver an der Containerkaje in Altenwerder (Track 4, 1500 mg/l abnehmend mit Fahrt auf 15 mg/)

Literatur

ALBERTSON M.L., DAI Y.B., JENSEN R.A., and ROUSE H.: Diffusion of a submerged jets. *Transcript of the ASCE (Paper No. 2409)*, (115), 639 – 697, 1950.

DHI: MIKE 3 Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography. Scientific Documentation, Hørsholm, Dänemark, 2013.

LAM W., HAMIL G.A., SONG Y.C., ROBINSON D.J., AND RAGHUNATHAN S. a). A review of the equations used to predict the velocity distribution within a ship's propeller jet. *Ocean Engineering*, Elsevier, (38), 1-10, 2011.

OPENFOAM: The Open Source CFD Toolbox. User Guide, version 2.2.2, 2013, www.openfoam.org.

ULICZKA, K. UND KONDZIELLA, B., Dynamic response of very large containerships in extremely shallow water, Proceedings of the 31st PIANC Congress, Estoril, Spanien, 2006

Verfasser

Dr. Oliver Stoschek

DHI-WASY GmbH
Max-Planck-Straße 6
28857 Syke
Tel.: 04242/1638-18
E-Mail: ost@dhi-wasy.de

Dr. Elimar Precht

DHI-WASY GmbH
Max-Planck-Straße 6
28857 Syke
E-Mail: epr@dhigroup.de

Dr. Ole Larsen

DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Mamta Jain (Ph. D.)

DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Lars Yde (ChEng)

DHI Water & Environment (S) Pte. Ltd., Singapur

Dipl.-Ing. Nino Ohle

HPA Hamburg Port Authority
Neuer Wandrahm 4
20457 Hamburg
Tel.: 040/42847-0
E-Mail: nino.ohle@hpa.hamburg.de

Dipl.-Ing. Thomas Strotmann

HPA Hamburg Port Authority
Neuer Wandrahm 4
20457 Hamburg
Tel.: 040/42847-0
E-Mail: thomas.strotmann@hpa.hamburg.de