2.7 Seehafenzufahrten

Optimierung einer Hafenzufahrt im Shastra Ästuar, Indien

Dr.-Ing. Oliver Stoschek
DHI-WASY GmbH, Syke

Prof. Jens Froese
Jacobs Universität, Bremen

Dr. Ole Larsen
DHI-NTU Water & Environment Research Centre and Education Hub, Singapur

1. Zusammenfassung

Die Unterhaltung von Hafenzufahrten bestimmt in vielen Fällen den größten Teil des jährlichen zur Verfügung stehenden Budgets von Seehäfen. Während der Durchführung der Maßnahmen zur Freihaltung der Schifffahrtswege von Sedimenten kann es zudem zu Störungen im Hafenbetriebsablauf kommen.

Das Ziel dieser Studie ist eine Optimierung der Hafenzufahrt bezüglich des Sedimenttransportes. In der hier vorgestellten Studie wurden die Bereiche Nautik, Hydrodynamik und Sedimenttransport interaktiv miteinander verknüpft, um die Hafenzufahrt zu einem neu geplanten Hafen an der Westküste Indiens zu optimieren.

2. Projektgebiet

Im indischen Bundesstaat Maharastra wird im Rahmen des Baus eines Anlegers für Massengutschiffe im Fluss Shastra River (ca. 200 km südlich von Mumbai) das Ästuar ausgebaut, um Handysize Bulkern (Abb. 4) die Zufahrt zu einer neuen Verladeanlage zu ermöglichen. Hierfür muss eine Sandbank gequert bzw. vertieft werden (Bild 1).

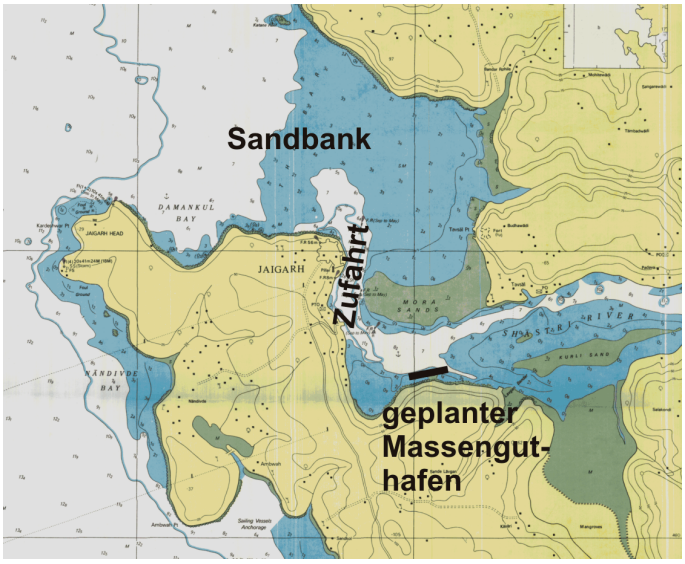

Bild. 1: Geplante Einfahrt zum Shastra Ästuar

Als maßgebende Kriterien für die Planung galten die Sicherheit der Schifffahrt, die Herstellungskosten und die späteren Unterhaltungskosten.

Die Optimierung wurde für die Monsun- als auch die Trockenzeit mit Hilfe von numerischen Simulationen durchgeführt. Die nachfolgend dargestellten Berechnungen wurden parallel durchgeführt, um mit einem möglichst geringen (zeitlichen) Aufwand eine optimale Lösung zu finden.

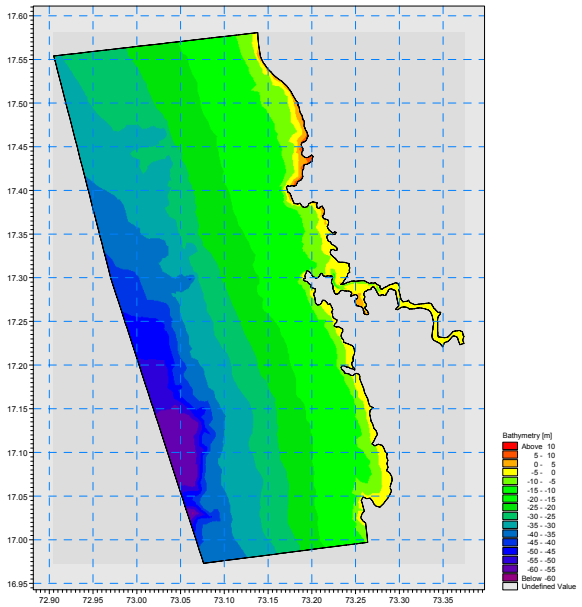

Bild 2: Modellbathymetrie

3. Hydrodynamische Modellierung

3.1 Modell

Die Basis für alle weiteren Untersuchungen stellt die Berechnung der Strömungen im Ästuar dar. Für die Untersuchungen wurde ein 3-dimensionales numerisches Modell der Flussmündung mit MIKE3FM (DHI, 2009a) aufgebaut. Das Modell ist ein flexibles Finite Volumen Modell (FV) das in der Vertikalen mit einem σ-Koordinatensystem in 8 Schichten aufgelöst wurde.

3.2 Kalibrierung

Die Randbedingungen für den Modellbetrieb stammen aus den nächstgelegenen Pegeln in Port Dabhol (30 km nördlich) und Ratnagiri Bay (40 km südlich). Die für die Kalibrierung betrachteten Tiden und die Ergebnisse der Kalibrierung (Messungen in Jaigarh) sind in Bild 2 dargestellt. Hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen dem Nordwest - Monsun (Oktober bis März) und dem regenreichen Südwest - Monsun (Juni- September). Hier fällt bei jeder zweiten Tide der Tidehub deutlich geringer aus.

Die Monsunzeit stellte während der Untersuchung eine besondere Herausforderung dar. Während des Monsuns fallen innerhalb von 3 Monaten ca. 1300 mm Niederschlag (Tabelle 1). Da der Oberwasserzufluss des Shastra nicht aufgezeichnet wird sowie keine Vermessungsdaten zur Bathymetrie des Flusses oberhalb des geplanten Anlegers vorlagen, konnte der nach Oberstrom verfügbare Speicherraum für das Tidevolumen nur geschätzt werden. Das Tidevolumen war somit ein Kalibrierungsparameter.

Die Kalibrierung ergab eine Länge des Speicherraumes von ca. 26 km. Die Turbulenz wurde mit einem Smagorinski Modell zu c_{smag} = 0.4 bestimmt. Die vertikale Turbulenz wurde durch ein standard k-ε Modell abgebildet. Der Zufluss zum Shastra wurde unter Berücksichtigung von NA-Berechnungen zu 3000 m³/s bestimmt.

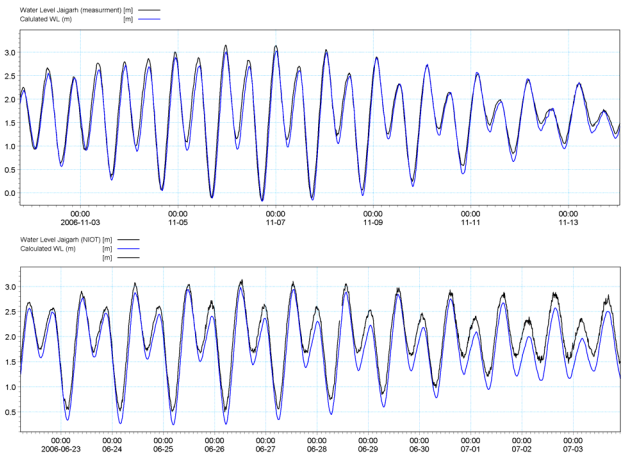

Bild 3: Vergleich der berechneten und gemessenen Wasserstände in Jaigarh während des NW-Monsun (oberes Bild) und wärend des SW-Monsun (unteres Bild)

3.3 Klima

Jaigarh liegt 45 km nördlich von Ratnagiri an der Westküste von Indien. Das Klima wird durch die Lage in der Nähe zu den Tropen und dem jährlichen Monsun bestimmt. Während der Winterzeit gibt es eine vorherrschende Windrichtung aus N bis NW mit Geschwindigkeiten von bis zu 20 Knoten. Während des Monsuns wechselt die vorherrschende Windrichtung auf W bis SW bei Windgeschwindigkeiten von bis zu 70 Knoten. Die größten Niederschlagsmengen fallen zwischen Juni und Juli (Tabelle 1).

3.4 Ergebnisse der hydrodynamischen Berechnungen

Für das kalibrierte Modell wurden die 3 maßgebenden meteorologischen Jahreszeiten untersucht (Nordwest (NW) - Monsun - Südwest (SW) - Monsun - Pre-Monsun) Der NW-Monsun und die Zeit außerhalb des Monsuns (Pre-Monsun) unterscheiden sich vorrangig durch die Windrichtung, während der SW-Monsun durch geringere Windgeschwindigkeiten und sehr große Niederschlagsmengen gekennzeichnet ist.

Die in Abbildung 4 dargestellten unterschiedlichen Bathymetrien wurden für die 3 o.g. Jahreszeiten untersucht. Die endgültige Bathymetrie beinhaltet eine optimierte Zufahrt.

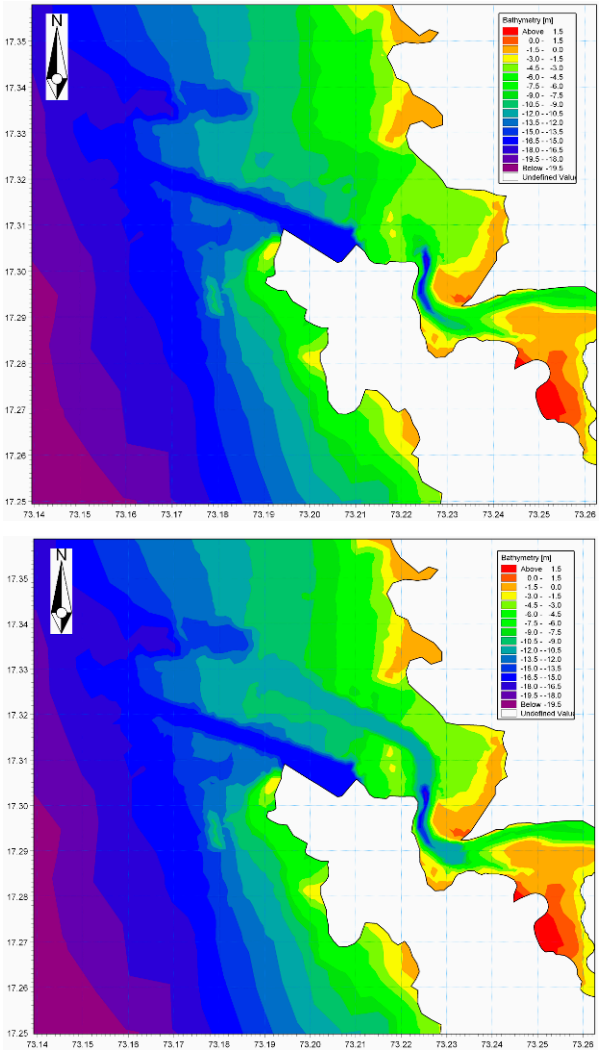

Bild 4: Bathymetrie im Ausgangszustand und die endgültige Bathymetrie mit optimierter Zufahrt

Während des SW-Monsuns findet im Ästuar teilweise aufgrund des hohen Oberwasserabflusses keine Tidekenterung mehr statt, während außerhalb der Monsunzeit Flutströmungen von bis zu 1 m/s auftreten können. Auch treten während des SW-Monsuns starke Dichteströmungen auf, die durch die Vertiefung der Zufahrt noch verstärkt werden.

	Jan.	Feb.	March	Apr	Mai	June	July	Aug.	Sep.	Okt.	Nov.	Dez.
Wind direction	N	N - NW		SW			N					
Wind speed [Knots]	<18 kts	< 20 kts		< 30 kts			<16 kts					
Wind speed [m/s]	9.3	10.3		15.4			8.2					
Rain [mm]	3				20	700		500	250	80	25	3
Temperatur [°C]	25		26	29	30	28	27			28	27	26

Tabelle 1: Mittlerer Niederschlag, Wind und Temperatur in Jaigarh, Berechnet aus einer 8-jährigen Zeitserie. (1999 – 2006)

4. Nautische Simulationen

4.1 Methode

Nautische Simulationen sind mittlerweile eine Standarduntersuchung zur Optimierung von Hafenzufahrten und Häfen sowie zur Bestimmung der Randbedingungen bei der Ansteuerung der Häfen. Die Bewertung der Simulationen kann durch eine statistische Auswertung oder durch Experten erfolgen.

Der Nachteil von statistischen Auswertungen ist die Vielzahl der benötigten Simulationen pro Szenario um verwendbare Ergebnisse zu erhalten. Selbst dann werden die Ergebnisse wahrscheinlich nicht den gesamten Umfang aller möglichen Abläufe enthalten, da es in der Regel sehr schwierig ist diese im Vorfeld erschöpfend zu spezifizieren. Ein weiterer Nachteil sind die Kosten für die hohe Anzahl von Simulationsläufen pro Szenario (> 30) und die daraus resultierende lange Simulationszeit.

Die Expertenmethode („Expert Rating“) ist aus der Erfahrung heraus deutlich effektiver. Für dieses Projekt wurde ein Kompetenzteam zusammengestellt, um optimale Ergebnisse zur Ansteuerung des Hafens zu erarbeiten. Hierfür wurden vor jeder weiteren Simulation operationelle und navigatorische Aspekte, sowie das Schiffsverhalten untersucht, bewertet und weiterentwickelt. Diese Methode ist zuverlässiger und umfassender als eine statistische Auswertung und wurde hier für das weitere Vorgehen verwendet.

4.2 Untersuchungen

Der Schwerpunkt lag auf der Untersuchung der Randbedingungen unter denen ein voll beladener Handysize Bulk Carrier mit ca. 55.000 t Verdrängung sicher zum Hafen gelangen kann (Abbildung 5).

Bild 5: Handysize Bulk Carrier

Zudem wurde das gleiche Schiff mit Ballast, ein Handymax Bulk Carrier und ein Container Feeder Schiff untersucht, jeweils unter unterschiedlichen Tide-, Strömungs- und Wetterbedingungen.

4.3 Simulationen

Die nautischen Untersuchungen mit einem Manövriersimulator (RDE-Anlage der Hochschule Bremen) wurden u.a. mit Strömungen aus dem o.g. 3-dimensionalen numerischen Modell gesteuert.

Das mathematische Modell umfasst alle relevanten Effekte für eine Naturnahe Simulation wie z.B.:

- Flachwasser- und Ufereffekte
- Effekte durch Schiffspassagen (Schiff / Schiff)
- Fendermodelle
- Ankerkräfte
- Grundberührungen
- Kollisionen

Der Einfluss des Wetters und der hydrodynamischen Parameter wurde ebenfalls berücksichtigt. Diese Effekte mussten durch die Schiffsführung ausgeglichen werden.

Das Expertenteam untersuchte und bewertete jede Simulation und legte die Randbedingungen für die folgende Simulation fest. Schritt für Schritt wurden eine „best practice“ Strategie entwickelt, die für die spätere Ausbildung der Lotsen dient.

Bild 6: **Schiffssimulator**

Das Auslaufmanöver des beladenden Schiffes stellte die Schiffsführung vor keine besonderen Anforderungen. Die Herausforderung lag in der Entwicklung einer Manöverstrategie für das Einlaufmanöver. Die Abb. 8 zeigt die beiden schwierigsten Phasen des Einlaufmanövers „Steilufer“ und „Anleger“. Zur Erfüllung der Untersuchungsmaxime „aktives Manövrieren mit Hilfe der schiffseigenen Propulsions- und Steuerkräfte“, d.h. Situationsbeherrschung notfalls auch ohne Schlepperunterstützung, ist die Trasse mit „minimum safe steering speed“, also der Mindestgeschwindigkeit zur Erhaltung der Steuerfähigkeit, zu durchfahren. Bei starken westlichen Winden, denen das Schiff auf südlichem Anlaufkurs vor Erreichen des Landschutzes ausgesetzt sein kann, betrug diese Mindestgeschwindigkeit zwischen 7 und 8 kn. Zur Vergrößerung des Radius der Kurvenbahn war das Steilufer möglichst dicht zu passieren. Den dabei auftretenden hydrodynamischen Wandeffekten, die eine erzwungene Kursänderung nach Backbord (Osten) zur Folge hatten, war manövriertechnisch zu begegnen.

Unmittelbar nach der Passage des Steilufers waren die Propellerumdrehungen zu erhöhen, um das Andrehmanöver nach Backbord zum sicheren Durchfahren der Trassenkurve durch erhöhten Ruderdruck zu unterstützen. Das Andrehen musste sehr zügig erfolgen, um so einen sicheren Passierabstand zum am westlichen

Fahrwasserrand gelegenen Anleger zu erreichen. Das darauf folgende Passieren des Anlegers durfte jedoch zum Schutz der dort festgemachten Fahrzeuge vor Welleneinfluss nur mit langsam drehendem Propeller und geringer Fahrt durchgeführt werden.

Es ist vorgesehen, rechtzeitig vor Inbetriebnahme des Hafens die örtlichen Lotsen und Schlepperkapitäne im Simulator zu schulen.

Bild 7: Zufahrt zum Hafen in Jaigarh

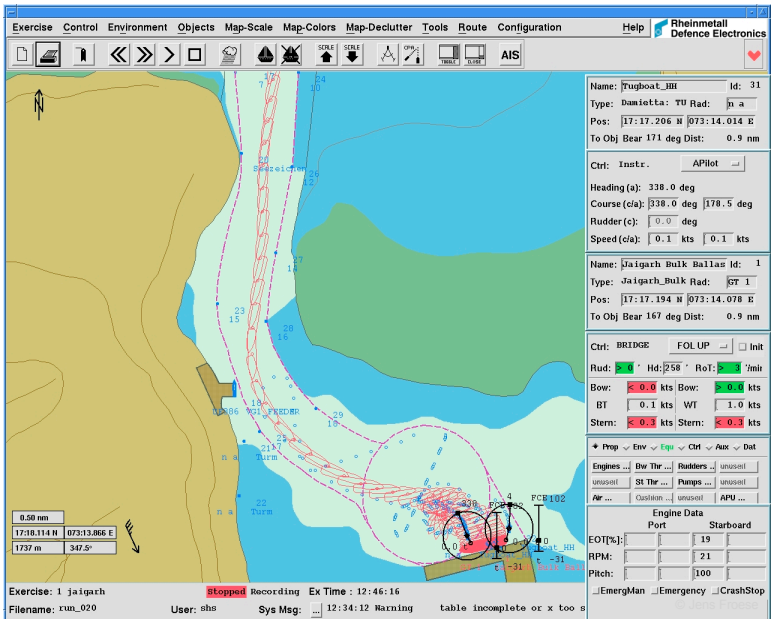

Bild 8: Nautische Simulation

Die Lage des Schiffes zur Trasse und die Abfolge der Manöver spielen in diesen drei Phasen eine entscheidende Rolle. Das Werkzeug Simulation erlaubte dabei eine evolutionäre Entwicklung der Manöver an deren Ende eine Einlaufstrategie mit einem ausreichenden Vertrauensbereich stand. Die Empfehlung Schlepperassistenz mit je einem Vor- und Heckschlepper schafft zusätzliche Sicherheit auch im Falle eines Versagens der Schiffstechnik.

Die Simulation diente zusätzlich der Festlegung der visuellen Navigationshilfen (Richtfeuerlinien und Betonnung).

5. Morphodynamische Modellierung

5.1 Modell

Für die Untersuchung des Sedimenttransportes wurde eine Sand- und eine Schlufffraktion mit dem Modell MIKE3 MT (DHI, 2009C) untersucht. Die Untersuchung wurde für die beiden in Abbildung 3 dargestellten Bathymetrien durchgeführt, um die Änderungen im Sedimenttransport bestimmen zu können.

In einem iterativen Vorgang mit den nautischen Untersuchungen wurde die Lage der Zufahrt optimiert, um möglichst geringe Unterhaltungskosten zu erreichen.

5.2 Randbedingungen

Um einen Überblick über die morphologische Entwicklung währen der unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen zu bekommen, wurde ein ganzes Jahr im Modell berücksichtigt. Da das 3-dimensionale Modell nicht ein komplettes Jahr rechnen kann, wurde ein mittleres Jahr in 3 maßgebende Teile aufgeteilt:

- SW-Monsun (~238 Tiden)
- NW-Monsun (~358 Tiden)
- Pre-Monsun (~119 Tiden)

Zur Beurteilung der langfristigen morphologischen Änderungen wurde der in Tabelle 2 dargestellte morphologische Faktor eingeführt.

Ein nennenswerter Küstenlängstransport findet nicht statt. Das vorliegende sandige und schluffige Material stammt überwiegend aus dem Shastra Ästuar und wird während dem SW-Monsun bis auf die äußere Sandbank transportiert.

Case		Mean Diameter [mm]	Settling velocity [m/s]	Sediment Concentration Shastra River (non tidal) [kg/m³]	Material composition sand / clay	Morphological factor [-]
SW-Monsoon	Mud	0.03	0.0005	0.8	40:60	9
	Sand	0.1	0.0085	0.8		
NW-Monsoon	Mud	0.03	0.0005	0.05	70:30	13
	Sand	0.1	0.0085	0.05		
Pre-Monsoon	Mud	0.03	0.0005	0.01	70:30	2
	Sand	0.1	0.0085	0.01		

Tabelle 2: Sedimenteigenschaften

Der Nordwest-Monsun mit starkem Wind hat jedoch auch über den Seegang einen Einfluss auf die Sedimentbewegungen. Zur Berücksichtigung des Seegangs wurde ein „Nearshore Spectral Waves“ Seegangsmodell in die morphodynamischen Berechnungen integriert. Die Ausgangswellenhöhen sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

	Hm0 [m]	Tm [s]	Direction [deg.]	Wind Speed [m/s]	Wind direction [deg.]
SW-Monsoon	3	9	210	11	210
NW-Monsoon	1.5	6	360	8	360
Pre-Monsoon	3	9	210	11	210

Tabelle 3: Wellen im Indischen Ozean vor dem Shastra Ästuar

5.3 Modellqualität

Für die Untersuchung des Sedimenttransportes wurde je eine Sand- und eine Schlufffraktion untersucht (Tabelle 2). Die Daten stammen aus mehreren Probennahmen, die innerhalb eines Jahres erfolgt sind. Ein Abgleich mit der Natur konnte nur auf der Basis der Plausibilität stattfinden, da keine längerfristigen Aufzeichnungen von Schwebstoffen, Sedimentationen oder Baggerungen vorlagen.

5.4 Ergebnisse

Die neue Zufahrt durch die Sandbank wird Änderungen für den Sedimenttransport mit sich bringen. In der Abb. 9 sind die Gesamtsedimentationshöhen gegen Ende einer konstruierten SW-Monsun Periode mit und ohne Zufahrt dargestellt. Für alle hier untersuchten Jahreszeiten und Fraktionen wurden vergleichbare Abbildungen erstellt. Die Ergebnisse können aufgrund der unzureichenden Kalibrierung wegen der fehlenden Daten jedoch nur qualitativ gewertet werden.

Die Sedimentation und Erosion ist überwiegend vergleichbar mit der bestehenden Situation. Der überwiegende Teil der Sedimentationen erfolgt währen des SW-Monsuns aufgrund des stark sedimentbelasteten Oberwassers während bei einem starken NW-Wind aufgrund der hohen Wellen auf der Sandbank Material erodiert wird. In dem Zeitraum zwischen diesen beiden Extremen (Pre-Monsun) erfolgt nahezu keine signifikante Umlagerung oder Ablagerung von Sedimenten.

Der Einfluss der Zufahrt ist am deutlichsten während des SW-Monsuns zu erkennen. Aufgrund der Änderungen in den Strömungsgeschwindigkeiten nimmt im Bereich der Sandbank die Sedimentation im Kanal im Vergleich zu bestehenden Situation ab. Es stellt sich ein Spüleffekt ein. Der Schwerpunkt der Sedimentation verlagert sich in die strömungsberuhigten Randbereiche.

6. Kosten-Nutzen Analyse

Für die Kosten-Nutzen Analyse wurde auf der Basis der PIANC Richtlinie für das Design von Zufahrtskanälen (PIANC, 1994) und mehreren schiffdynamischen Simulationen von der Firma CORES Ltd. (Bulgarien) durchgeführt. Für den äußeren Bereich der Zufahrt wurde für verschiedene Wassertiefen bei einer Wellenhöhe von Hs ≤ 3.50 m die Kosten ermittelt. Auf der Basis der

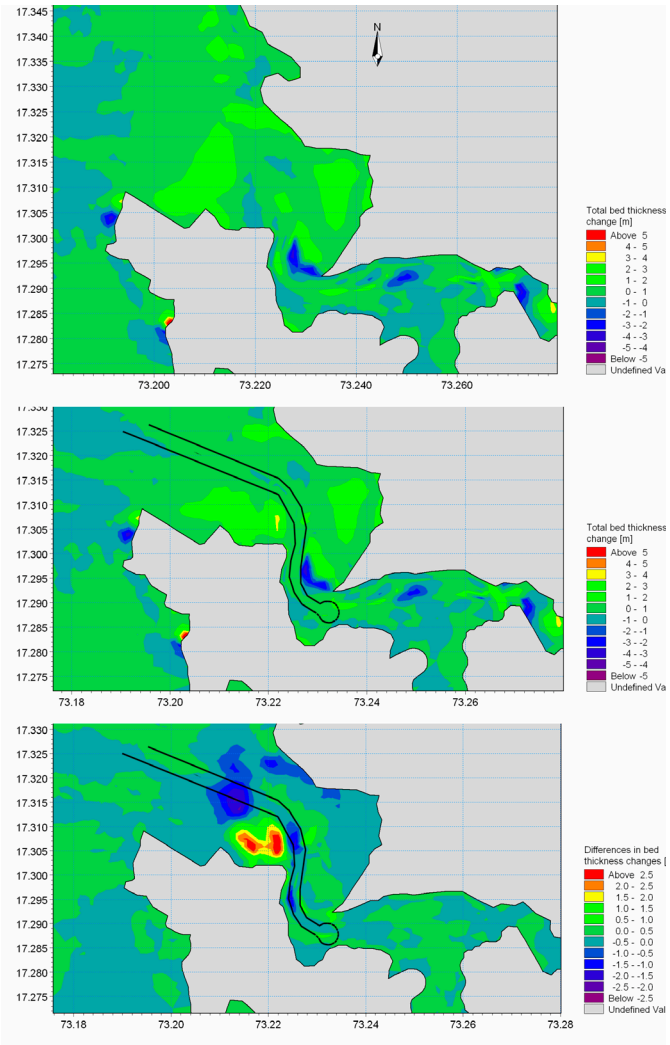

Bild 9: Sedimentation und Erosion im Shastra Ästuar im Ausgangszustand (oben) und mit Zufahrtskanal (mitte) sowie die Differenzen (unten) nach 238 Tiden während des SW-Monsuns

Erreichbarkeit des Hafens wurde die äußere Zufahrtstiefe bis zur Sandbank auf -11.8 m bestimmt. Der innere Teil hat aufgrund der wellenabschirmenden Wirkung eine Fahrrinnentiefe von -10.8 m. Der maßgebende Bemessungsfall sind die während des Nord-West Monsuns auftretenden hohen Wellen.

7. Zusammenfassung

Die Untersuchungen zur Hydrodynamik und zum Sedimenttranport wurden interaktiv mit einer nautischen Studie verbunden, um die Position und Abmessungen einer neuen Hafenzufahrt im Shastra Ästuar zu optimieren. Ein 3-dimensionales Modell (MIKE3) wurde für diesen Brackwasserbereich aufgebaut, um den Sedimenttransport zu berechnen und um Strömungsdaten für die nautischen Untersuchungen zur Verfügung zu stellen.

Aus den Vorbesprechungen und den daraus resultierenden Untersuchungen ergaben sich der in Abb. 10 dargestellte Verlauf der Zufahrt sowie eine Wassertiefe in der Zufahrt von -11,8 m LAT bis -10,8 m LAT. Die Lage der Zufahrt, sowie deren Tiefe und Breite resultiert aus der o.g. Untersuchung zur Minimierung der Sedimentation, den nautischen Untersuchungen zur optimalen Ansteuerung der Verladeanlage und einer Kosten-Nutzen Analyse.

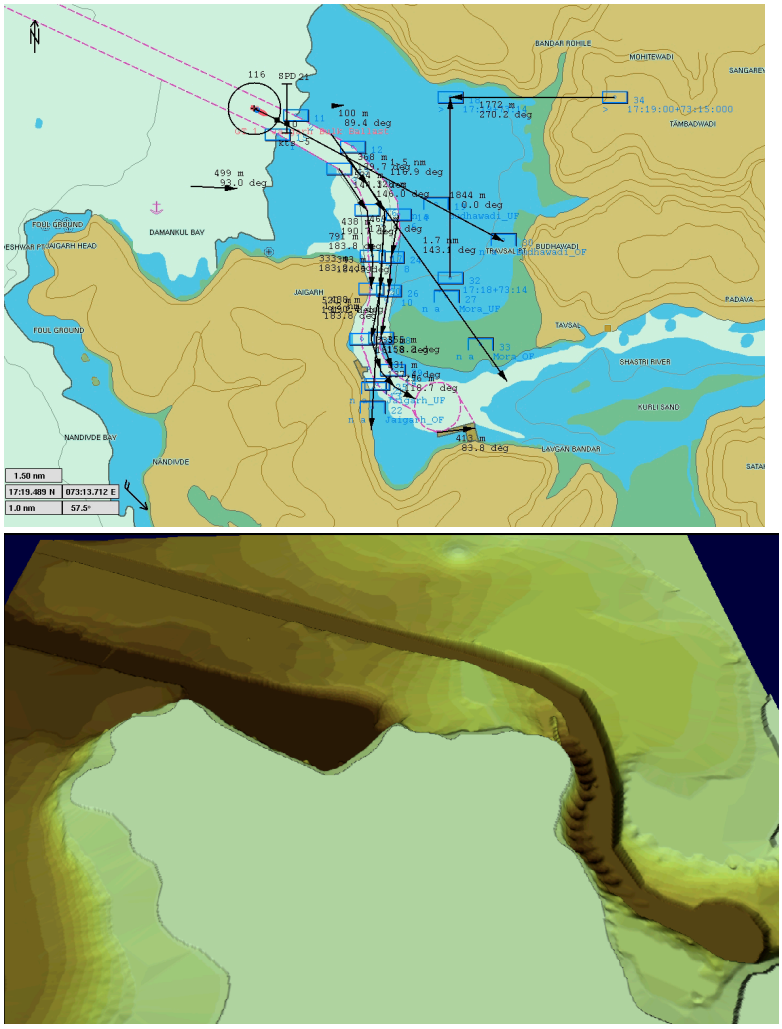

Bild 10: Optimierte Zufahrt

Literatur

DHI, 2009A: MIKE3: Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography, Scientific Documentation, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark

DHI, 2009B: MIKE21: Nearshore Spectral Wind-Wave Module, Scientific Documentation, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark

DHI, 2009C: MIKE3: Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography, Mud Transport Module, Danish Hydraulic Institute, Horsholm, Denmark

PIANC, 1994: Approach Channels, a Guide for Design, Final Report, of the Joint Working Group PIANC-IAPH, Supplement to Bulletin No. 95

Verfasser

Dr.-Ing. Oliver Stoschek
DHI-WASY GmbH
Niederlassung Syke
Max-Planck-Str. 6, 28857 Syke
Telefon: 04242/1638-0
E-Mail: ost@dhigroup.com

Prof. Jens Froese
Workgroup Maritime Logistics
School of Engineering and Science
Jacobs University Bremen
Campus Ring 1, 28769 Bremen
Telefon: 0421/200-3137
E-Mail: j.froese@jacobs-university.de

Dr. Ole Larsen
Centre Director
DHI-NTU Water & Environment Research Centre and Education Hub
200 Pandan Loop, #08-03 Pantech 21
Singapore 128388
Telefon: +65-6777-6330
E-Mail: ola@dhigroup.com