

Kolkbildung im Umfeld zylindrischer Objekte sowie deren Versandung im Wasserkanalexperiment.

P. Menzel und A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik
Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

Einleitung

Das Auf- und Wiederfinden von Objekten, die am Meeresboden lagern, stellt in vielen Bereichen der Meeresnutzung eine besondere Herausforderung dar. Leistungsfähige Fächerecholote erleichtern hierbei die Suche nach den unterschiedlichen Gegenständen. In Abhängigkeit von der Beschaffenheit des Meeresbodens und des Sedimenttransports kommt es jedoch aufgrund von turbulenten bodennahen Strömungen zur Versandung dieser Objekte. Mit Hilfe experimenteller und numerischer Untersuchungen soll im Rahmen dieses Forschungsprojektes die Versandung von Objekten mit unterschiedlicher Geometrie untersucht werden. Der vorliegende Beitrag stellt erste Ergebnisse zum Versandungsprozess eines am Meeresboden lagernden Zylinderabschnitts vor.

Hintergrund und Fragestellung

Die Versandung von Objekten am Meeresboden wird, wie in Wilkens & Richardson (2007) gezeigt, durch unterschiedliche Prozesse hervorgerufen und hängt von einer großen Anzahl von Variablen ab, wie es auch in Jenkins et al. (2007) beschrieben wird. Hierbei kann zwischen Prozessen im Fernfeld, wie z.B. Rippel und Dünen, die, wie in Cataño-Lopera (2007), Jenkins et al. (2007) und Wilkens & Richardson (2007) beschrieben, nicht von der Anwesenheit des versandenden Objektes abhängen und Prozessen im Nahfeld unterschieden werden. Hierbei hängen die Versandungsprozesse im Nahfeld direkt von der Anwesenheit der Objekte, deren Form sowie Interaktionen mit dem Fluid und Sediment ab. Generell muss zwischen einer konstanten Anströmung und einer, wie in Trembanis et al. (2007) beschrieben, durch Oberflächenwellen oder Gezeiten getriebenen, oszillierenden Anströmung unterschieden werden.

Das Endziel der Untersuchungen ist es, ein numerisches Modell zu entwickeln, welches die an einem am Meeresboden lagernden Objekt auftretende Kolkbildung sowie dessen Versandung vorhersagen kann. Hierzu ist ein gutes Verständnis der einzelnen Kolk- und Versandungsprozesse notwendig. Laborversuche, in Verbindung mit Experimenten im Realmaßstab, sollen hierzu beitragen, wobei die einzelnen Kolk- und Versandungsprozesse sowie deren Wechselwirkungen einzeln untersucht werden können. Erste Versuche zur Kolkbildung im Umfeld eines am Boden lagernden Zylinders wurden bei gleichmäßiger Anströmung vorgenommen.

Die Übertragbarkeit der im Laborversuch erzielten Ergebnisse stellt eine Basis für die Gültigkeit der Untersuchungsergebnisse dar. Hierzu wurden PIV-Messungen im Windkanal unter Einhaltung der Reynoldszahl durchgeführt. Die so erzielten Ergebnisse können die im Realmaßstab auftretenden Wirbel- und Turbulenzstrukturen darstellen. Die Versuche im Wasserkanal wurden durchgeführt, um den Sedimenttransport im Umfeld des Zylinderobjektes widerzugeben. PIV-Messungen im Wasserkanal sollen zeigen, in wieweit die Strömungsstrukturen im Wasserkanal bei versuchsbedingter niedrigerer Reynoldszahl mit denen im Windkanal übereinstimmen. Die so validierten Ergebnisse aus Wind- und Wasserkanalmessungen sowie Beobachtungen im Realmaßstab können wiederum zur Validierung numerischer Simulationen herangezogen werden.

Versuchseinrichtungen

Die Windkanalmessungen wurden im Windkanal des Lehrstuhl Strömungsmechanik durchgeführt. Dieser Kanal sowie das verwendete Time Resolved Stereo PIV System (TR-Stereo-PIV) sind ausführlich in Jensch (2011) sowie Menzel et al. (2012) beschrieben. Eine Darstellung des verwendeten Messaufbaus sowie eine Beschreibung der Versuchsdurchführung ist ebenfalls in Menzel et al. (2012) nachzulesen.

Zur Untersuchung der Versandung von Objekten im Labor wurde der in Menzel (2010) ausführlich beschriebene Wasserkanal zur Erzeugung geschichteter Strömungen umgebaut. Hierzu wurde ein doppelter Boden in die Messstrecke eingezogen, wodurch sich eine geringere Wassertiefe mit höherer Strömungsgeschwindigkeit erreichen lässt und weitere Manipulationsmöglichkeiten möglich sind. Zusätzlich wurden strömungsformende Einrichtungen im Einlassbereich installiert, um eine homogene Anströmung zu erreichen.

Als Untersuchungsobjekt wurde in beiden Versuchen ein Zylinderabschnitt verwendet, der, wie in Abb. 1 gezeigt, im Windkanal auf einer großen Endscheibe und im Wasserkanal auf der ebenen Sandoberfläche gelagert wurde.

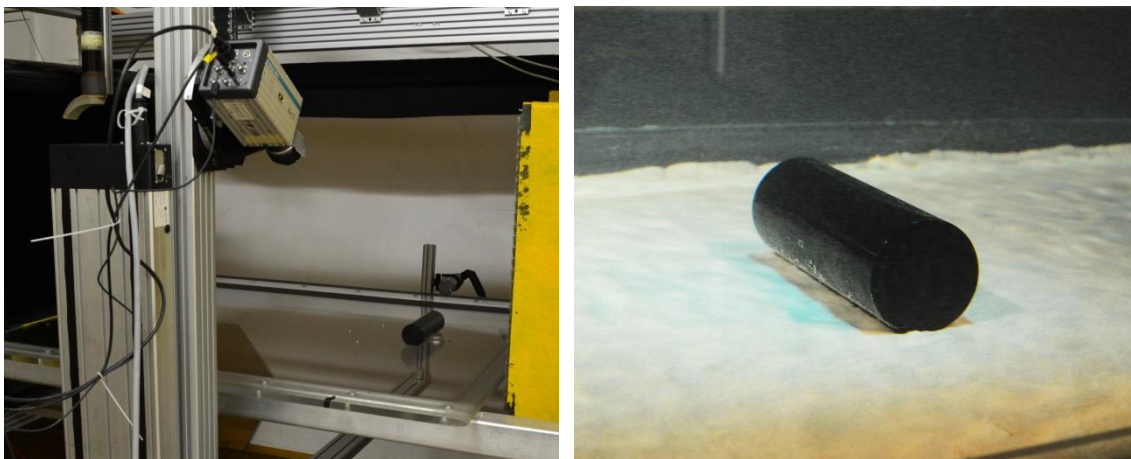


Abb. 1: Messanordnung im Windkanal (links) sowie im Wasserkanal (rechts)

Die Parameter der unterschiedlichen Versuche sowie der numerischen Simulation sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Parameter der unterschiedlichen Experimente

	Ozean	Laborexperiment		Simulation
		Wasserkanal	Windkanal	RANS
Zylinderdurchmesser D/cm	60	5.8	5.8	5.8
Zylinderlänge L/cm	200	19	19	19
Anströmgeschwindigkeit U_0/ms^{-1}	1	0.14	40	40
Zylinder-Reynoldszahl Re_z	$6 \cdot 10^5$	$1.7 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^5$
Korndurchmesser d_k/mm	≈ 1	0.1 to 0.3	-	-
PIV Repititionsrate	-	15 Hz	1 kHz	-
Anzahl der Geschwindigkeitsvektorfelder pro Messebene	-	100	2048	-

Da im Wasserkanal die für die Versandung charakteristischen Prozesse wie Erosionsbeginn, Sedimenttransport und Akkumulation nachgebildet werden sollen, liegt der Fokus auf der Einhaltung der hierfür charakteristischen Bedingungen. Nach Shields (1936) lassen sich diese Prozesse über den nach ihm benannten Shields-Parameter

$$Sh = \frac{\tau_w}{(\rho_s - \rho)gd_k} \quad [1]$$

mit der Wandschubspannung τ_w sowie den Sand und Wasserdichten ρ_s und ρ charakterisieren. Oberhalb eines kritischen Wertes Sh_c kommt es zum Bewegungsbeginn von Sedimentpartikeln.

Messungen und Ergebnisse

Untersuchungen zur Übertragbarkeit der Ergebnisse

Infolge der Reynoldsähnlichkeit zwischen der im Ozean auftretenden Objektumströmung und den in den Windkanalversuchen eingestellten Randbedingungen, kann davon ausgegangen werden, dass die mittels TR-Stereo-PIV im Windkanal ermittelten Ergebnisse die im Ozean auftretenden Wirbel- und Turbulenzstrukturen reproduzieren. Als ein charakteristisches Kennzeichen für die Ähnlichkeit wurde das Nachlaufgebiet untersucht. Im Windkanal sowie im Wasserkanal wurde die Länge des Rezirkulationsgebietes mittels PIV bestimmt und eine Übereinstimmung festgestellt. Demnach kann davon ausgegangen werden, dass auch die Lage der Ablöselinie an der Zylinderoberfläche bei beiden Versuchen übereinstimmt. Somit ist bestätigt, dass die Strömungsverhältnisse im Wasserkanal, im Windkanal und im Ozean über den eingestellten Bereich weitgehen unabhängig von der Reynoldszahl sind.

Fotografische Analyse des Versandungsvorgangs

Zum besseren Verständnis des Versandungsprozesses wurden fotografische Zeitrafferaufnahmen im Wasserkanal angefertigt. Einige ausgewählte Bilder zu verschiedenen Zeitpunkten und bei unterschiedlichen Shields-Parametern Sh sind in Abb. 2 dargestellt.

Die Ausgangslage des Zylinders ist in Abb. 2 (a) dargestellt. Zur Verdeutlichung der Lage ist die obere Kante mit einer Linie gekennzeichnet, während das Kreuz einen Punkt auf der Mantelfläche markiert. Bei Anströmung unter Einhaltung des kritischen Shields-Parameters Sh_c mit $Sh/Sh_c = 1$ kommt es lediglich zu sehr geringem Bodenfracht-Sedimenttransport, woraufhin sich vor und seitlich des Zylinders kleine Erosionsgebiete im Bereich des zu erwartenden Hufeisenwirbels ergeben (Abb. 2 (b)). Bei Steigerung der Anströmgeschwindigkeit (Abb. 2 (c)) zeigt sich schnell eine Vertiefung des Kolkloches im vorderen Bereich, woraufhin der Zylinder beginnt, auf einer Seite in das seitliche Kolkloch zu kippen (Abb. 2 (d)). In Abb. 2 (e) ist der Zustand nach etwa 5 Minuten bei $Sh/Sh_c = 1,3$ dargestellt. Der Zylinder ist stromauf in das vordere Kolkloch gerollt. Gleichzeitig wurde die Anströmgeschwindigkeit erneut erhöht. Bei $Sh/Sh_c = 1,8$ zeigt sich in Abb. 2 (f) ein weiteres Rollen in Richtung der Anströmung in das entstandene Kolkloch. Es wird deutlich, dass das durch den zu erwartenden Hufeisenwirbel erzeugte Kolkloch für die Versandung des Zylinders verantwortlich ist, während das Akkumulationsgebiet im Nachlauf ein Rollen stromab verhindert sowie eine zusätzliche, entgegen der Anströmrichtung gerichtete Kraft auf den Zylinder ausübt.

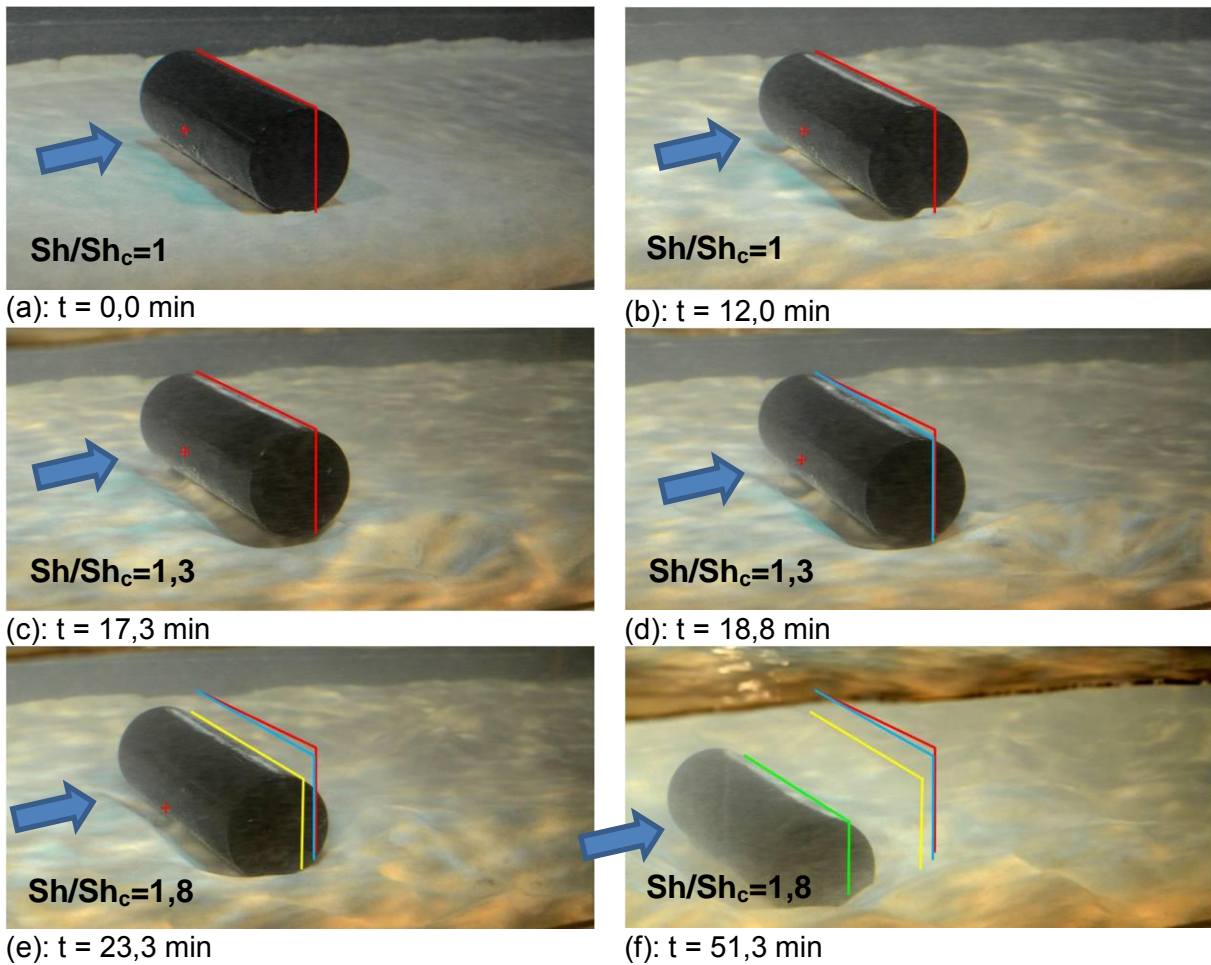


Abb. 2: Versandungsvorgang eines Zylinders im Wasserkanal

Das Prinzip der Versandung ist modellhaft in Abb. 3 dargestellt, wobei sich in b zuerst ein Akkumulationsgebiet gegenüber dem Ausgangszustand a bildet. Die Bildung des Kolkloches im Vorlauf (c) führt zum Rollen des Zylinders in das Loch (d). Eine erneute Vertiefung des Kolkloches (e) führt zu weiteren Rollbewegungen (f).

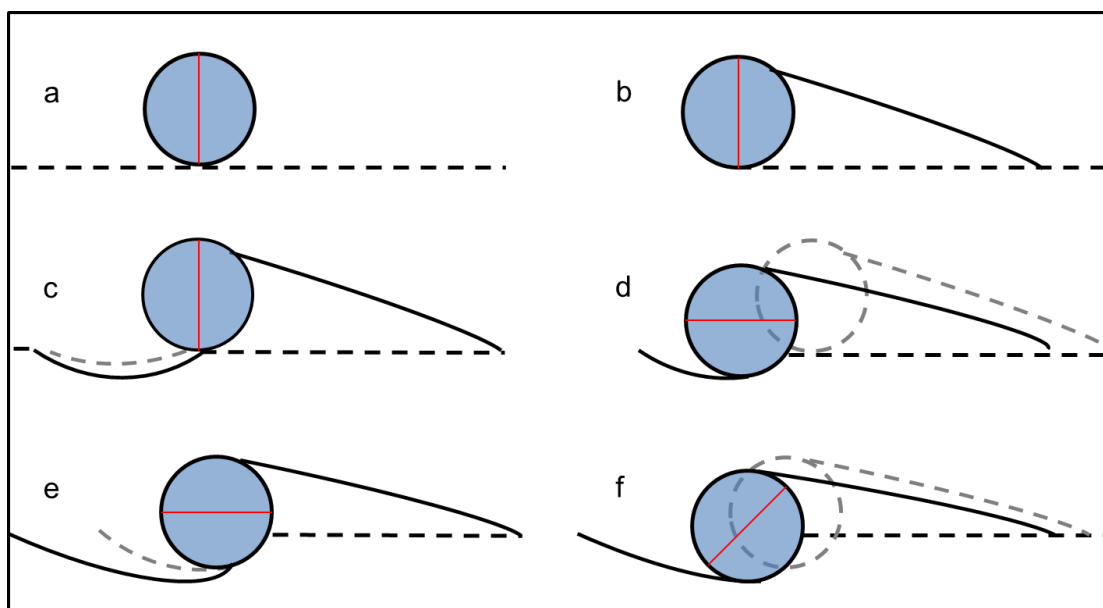


Abb. 3: Versandungsmodell eines Zylinderabschnitts

Die Versandungstiefe hängt demnach von der Tiefe des entstehenden Kolkloches ab. Die Tiefe des Kolkloches wiederum hängt von der Größe und Intensität des Hufeisenwirbels ab. Der Durchmesser des Hufeisenwirbels wiederum hängt unter anderem von der Dicke der Grenzschicht ab, die selbst wieder an die mittlere Rippelhöhe gebunden ist.

Akkumulationsgebiet im Nachlauf

Die Einhüllende des Rezirkulationsgebietes eines um 10% seines Durchmessers versandeten Zylinderabschnitts ist in Abb. 4 als Isofläche dargestellt. Aufgrund der auftretenden Wirbelstrukturen, welche anhand von Stromlinien aufgezeigt werden und deren Wirbelkernlinien bereits in Menzel et al. (2012) dargestellt wurden, kann in Zusammenhang mit der relativ niedrigen relativen Strömungsgeschwindigkeit auf diesen Stromlinien davon ausgegangen werden, dass es zur Akkumulation von Sediment im Bereich des Rezirkulationsgebietes kommt.

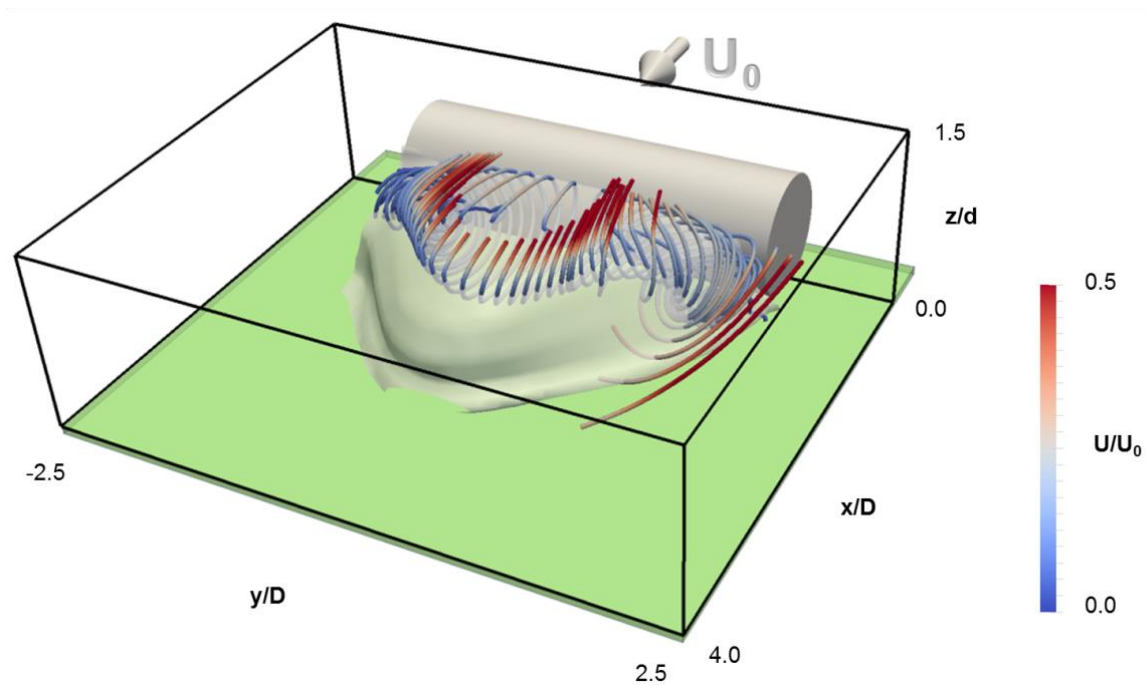


Abb. 4: Einhüllende des Rezirkulationsgebietes als Isofläche sowie Stromlinien, eingefärbt mit dem Geschwindigkeitsbetrag.

Gestärkt wird diese Annahme durch den in Abb. 5 gezeigten Verlauf der Wandschubspannung und des daraus berechneten Shields-Parameters. Demnach ist im Ozean bei einer Anströmgeschwindigkeit von $U_0 = 0,27$ m/s und einem Teilchendurchmesser von $d_k = 3$ mm keine Erosion im Bereich des Rezirkulationsgebietes möglich. Das Rezirkulationsgebiet hat Eigenschaften eines Sandfangs für große Sedimentpartikel, welche vor dem Zylinder erodiert wurden und falls sie in das Rezirkulationsgebiet verfrachtet werden, dieses nicht verlassen können. Kleinere Partikel können das Rezirkulationsgebiet durch turbulente Strömungsbewegungen im Inneren dieses Bereiches durchaus verlassen.

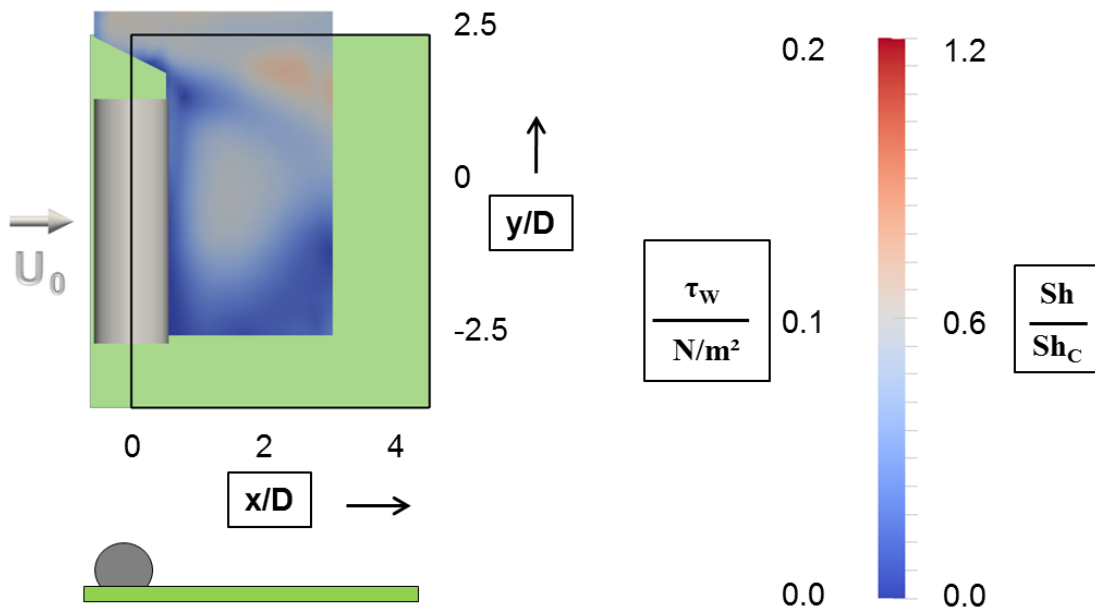


Abb. 5: Wandschubspannung und der daraus berechnete Shields-Parameter im Zylindernachlauf.

Betrachtet man die im Wasserkanal auftretenden Versandungsstrukturen, wie sie in Abb. 6 fotografisch festgehalten sind, so werden die auf den Geschwindigkeitsmessungen basierenden Vermutungen bestätigt.



Abb. 6: Erosions- und Akkumulationsgebiete im Umfeld des Zylinderabschnitts

Im Nachlauf des Objektes bildet sich ein Akkumulationsgebiet, welches bis zur Ablöselinie heranreicht. Der Bereich der Ablösung ist in Abb. 6 ebenfalls gut zu erkennen, wenn auch nicht zweifelsfrei exakt zu bestimmen.

Im Ozean sind die Randbedingungen nicht einstellbar und nicht über einen längeren Zeitraum konstant. Es können somit nur Fälle betrachtet werden, bei denen die Bedingungen annähernd mit denen im Versuchskanal übereinstimmen. Abb. 7 zeigt einen am Meeresboden versandeten Zylinder. Es wird deutlich, dass sich auch hier ein Akkumulationsgebiet im Nachlauf einstellt, während es zur Erosion von Sediment im vorderen und seitlichen Bereich kommt. Ebenfalls zu erkennen ist, dass die Zylinderachse geneigt ist, wie es auch in Abb. 2 (d) gezeigt wurde.



Abb. 7: Erosions- und Akkumulationsgebiete im Umfeld des Zylinderabschnitts am Meeresboden (Foto: WTD 71)

Erosion im Bereich des Hufeisenwirbels

Die Anwesenheit eines Hufeisenwirbels im vorderen Bereich des Zylinderabschnitts kann bereits auf Basis von visuellen Beobachtungen im Wasserkanal bestätigt werden. Die Ausdehnung des Wirbels jedoch scheint deutlich größer zu sein, als es durch einfaches Aufrollen der Grenzschicht zu erwarten ist. Hier spielt die runde Vorderseite des liegenden Zylinders eine große Rolle ebenso wie die durch Rippel im Vorlauf induzierte Geschwindigkeitsgradient in vertikaler Richtung. Das Kolkloch vor dem Zylinder sowie numerische Simulationen, die parallel durchgeführt wurden, deuten ebenfalls darauf hin, dass der Durchmesser des Wirbels ca. 40 % des Zylinderdurchmessers D beträgt.

Zusammenfassung und Ausblick

Die Vorhersage der Versandung von zylindrischen Objekten am Meeresboden stellt eine große Aufgabe im Bereich der Meeresforschung dar. In Laborversuchen sollen die unterschiedlichen Versandungsprozesse nachgestellt und untersucht werden. Anhand von Windkanalversuchen wurde das Strömungsfeld mittel TR-Stereo-PIV unter Einhaltung der Reynoldszahl bestimmt. Der Vergleich mit Messungen im Wasserkanal zeigt, dass die Strömungsverhältnisse trotz unterschiedlicher Reynoldszahl im gewählten Bereich unabhängig von der Reynoldszahl sind. Die Versuche im Wasserkanal spiegeln demnach die natürlich auftretenden Strömungsverhältnisse wieder.

Durch fotografische Beobachtungen konnte das Versandungsverhalten des Zylinderabschnitts beschrieben werden. Demnach bildet sich ein Kolkloch im Bereich des Hufeisenwirbels, in welches der Zylinderabschnitt hineinrollt. Im Nachlauf befindet sich ein Akkumulationsgebiet für Sediment im Bereich der Rezirkulation, welches als Sedimentfalle für große Teilchen wirkt.

Danksagung

Dieses Forschungsvorhaben wird unterstützt durch eine Zuwendung der Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch die Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marinewaffen, Maritime Technologie und Forschung (WTD 71) in Eckernförde. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojekts.

Literatur

- Cataño-Lopera, Y.A.; Demir, S.T.; García, M.H.; (2007); Self-Burial of Short Cylinders Under Oscillatory Flows in Combined Waves Plus Currents; IEEE J. Ocean. Eng., vol. 32, no. 1, pp. 191-203, Jan. 2007.
- Jenkins, S.A.; Inman, D.L.; Richardson, M.D.; Wever, T.F.; Wasyl, J.; (2007); Scour and Burial Mechanics of Objects in the Nearshore; IEEE J. Ocean. Eng., vol. 32, no. 1, pp. 78-90, Jan. 2007.
- Jensch, M.; (2011), Strömungsanalysen zur Erfassung von Struktur und Dynamik turbulenter Nachlaufströmungen; MENZEL-Verlag; Ostseebad Kühlungsborn; ISBN 978-3-9813444-1-7
- Menzel, P.; (2010), Turbulente Mischungsvorgänge im Nachlauf einer dichtegeschichteten Zylinderumströmung, MENZEL-Verlag, Kühlungsborn, ISBN: 978-3-9813444-0-0
- Menzel, P.; Witte, M.; Leder, A.; Windkanalexperimente zur Bestimmung der Strömungsstrukturen um einen quer zur Anströmung auf einer Bodenplatte lagernden Zylinderabschnitt. In Proceedings der 20. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 4. - 6. September 2012, Universität Rostock, Hrsg.: Leder, A.; Brede, M.; Ruck, B.; Dopheide, D., ISBN 978-3-9805613-8-9, ISSN 2194-2447
- Shields, A.; (1936), Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung; Mitteilung der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, Berlin
- Trembanis, A.C.; Friedrichs, C.T.; Richardson, M.D.; Traykovski, P.; Howd, P.A.; Elmore, P.A.; Wever, T.F.; (2007); Predicting Seabed Burial of Cylinders by Wave-Induced Scour: Application to the Sandy Inner Shelf Off Florida and Massachusetts; IEEE J. Ocean. Eng., vol. 32, no. 1, pp. 167-183, Jan. 2007.
- Wilkens, R.H.; Richardson, M.D.; (2007); Mine Burial Prediction: A Short History and Introduction; IEEE J. Ocean. Eng., vol. 32, no. 1, pp. 3-9, Jan. 2007.