

## Versandung eines Zylinderabschnitts unter Einfluss von Oberflächenwellen im Laborversuch

P. Menzel und A. Leder

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

### Motivation

Die Versandung zylindrischer Objekte am Meeresboden wird nach Wilkens & Richardson (2007) durch unterschiedliche Prozesse hervorgerufen. Im Laborversuch sollen einzelne Prozesse, wie beispielsweise zeitlich konstante Anströmungen, Gezeitenströmungen und Oberflächenwellen einzeln nachgestellt und der Versandungsvorgang beobachtet und durch numerische Simulationen beschrieben werden. Umfangreiche Erkenntnisse zur Versandung verschiedener Objekte unter gleichmäßiger Anströmung sowie unter Einfluss von Gezeitenströmungen wurden bereits im Rahmen der Untersuchungen am Lehrstuhl Strömungsmechanik der Universität Rostock (Ism) durchgeführt und unter anderem in Menzel & Leder (2013) und Menzel et al. (2013) publiziert. Zur Erzeugung von Oberflächenwellen wurde der Versuchskanal mit einem Piston-Type Wellenerzeuger und einem Wellenabsorbersystem ausgestattet. Das neue Versuchssystem wurde erprobt und mit Hilfe von LDA-Messungen und optischer Bildauswertung charakterisiert. Mit dieser Versuchsanlage konnten erste Versandungsvorgänge eines Zylinderabschnitts unter Einfluss von Oberflächenwellen untersucht werden.

### Bisherige Untersuchungen

In vorangegangenen Versuchen wurde die Versandung eines Zylinderabschnitts mit dem Durchmesser  $D = 58$  mm unter zeitlich konstanter Anströmung sowie unter Einfluss von Gezeitenströmungen untersucht. Im Rahmen dessen wurden Versandungsversuche im Wasserkanal des Ism durchgeführt.

Die Übertragbarkeit der Ergebnisse aus dem Wasserkanal zu höheren, dem Realfall entsprechenden Reynoldszahlen, wurde durch PIV Messungen im Wasser- und Windkanal nachgewiesen. Hierbei wurden die Lage der Ablöselinie am Zylinder sowie die charakteristischen Strömungsstrukturen als Bewertungskriterien herangezogen. Die Messungen zeigten, dass es, wie in Abb. 1 als Isofläche des Q-Kriteriums ersichtlich, zur Ausbildung eines Hufeisenwirbels vor dem Zylindermodell kommt, welcher zur Erosion am Boden unmittelbar vor dem angeströmten Körper führt. Wird das Zylindermodell senkrecht zur Zylinderachse angeströmt, so befindet sich die Achse des Hufeisenwirbels parallel zur Zylinderachse und es entsteht ein Kolkgraben vor dem Zylinder. Im Nachlauf des Zylinders bildet sich ein Akkumulationsgebiet im Bereich der in Abb. 1 als Wirbelkernlinie des Bogenwirbels ebenfalls dargestellten Rezirkulation. Im weiteren Verlauf rollt der Zylinder entgegen der Anströmrichtung in den Kolkgraben. Dieser Vorgang wiederholt sich so lange bis ein Gleichgewichtszustand erreicht wird. Eine schematische Darstellung des Versandungsvorgangs findet sich in Abb. 2.

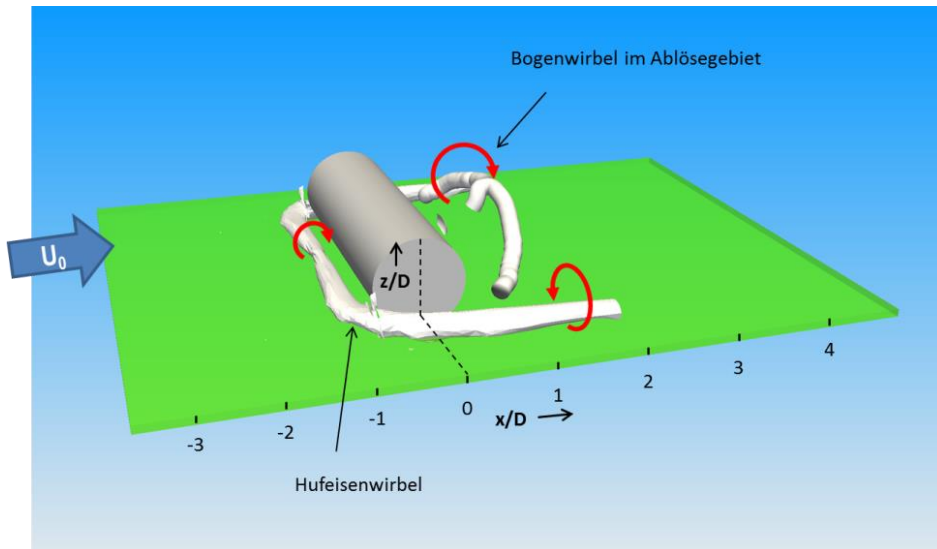


Abb. 1: Koordinatensystem und mittel PIV-Technik ermittelte charakteristische Wirbelstrukturen bei zeitlich konstanter Anströmung

In weiteren Untersuchungen wurde festgestellt und nachgewiesen, dass die maximale Versandungstiefe, unabhängig von einem Wechsel der Anströmrichtung, wie dies in Gezeitenrevieren auftritt, den gleichen Wert annimmt wie bei gleichmäßiger Anströmung. Aus den PIV-Messungen im Windkanal unter Variation des Anströmwinkels durch Drehung des Zylinders um die vertikale Achse ( $z$ ) konnte geschlossen werden, dass es ein strömungsinduziertes Drehmoment um diese Achse gibt, welches eine Ausrichtung der Zylinderachse senkrecht zur Anströmung bevorteilt. In Menzel et al. (2012) wurden Messungen hierzu vorgestellt und diskutiert.

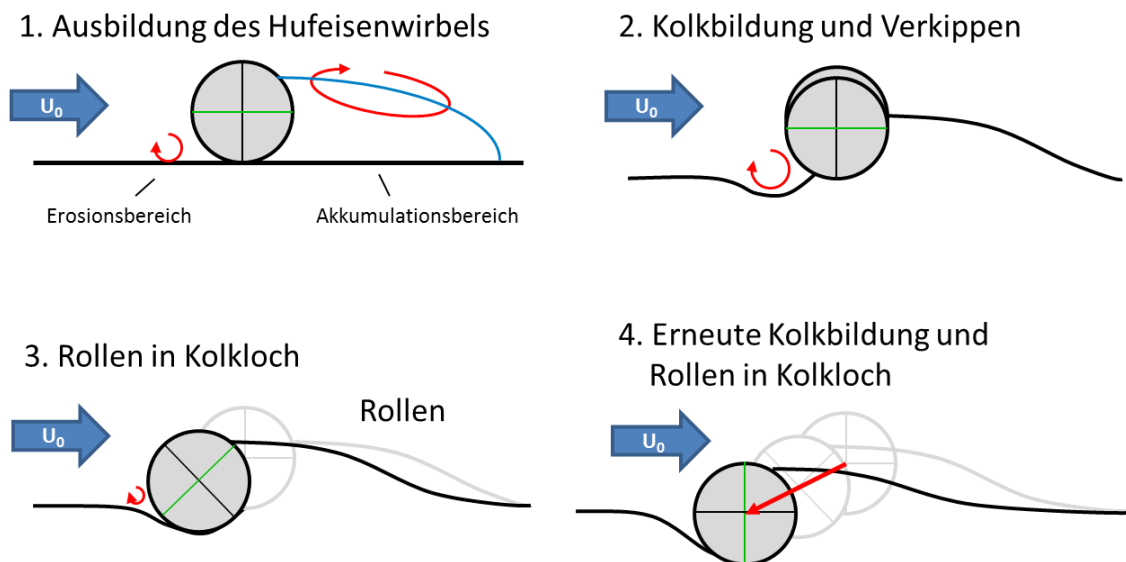


Abb. 2: Modell des Versandungsvorgangs eines zylindrischen Objektes

### Wellenkanal des Ism

Zur Untersuchung der Objektversandung und des Sedimenttransports wurde der bereits in Menzel (2010) beschriebene Wasserkanal am Ism verwendet. Die Messstrecke des Kanals hat eine Länge von etwa 3,5 m und eine Breite von 0,8 m. Das in den Versuchen verwendete Sediment hat eine Korngröße von  $0,1 \text{ mm} < d_k < 0,3 \text{ mm}$ . Genauere Angaben zum Versuchskanal finden sich u.a. in Menzel & Leder (2011).

Zu Untersuchung von welleninduzierten Sedimentbewegungen ist es notwendig, einen signifikanten Einfluss der Oberflächenwellen auf das Sediment zu gewährleisten. Dies ist dann gegeben, wenn das Verhältnis von Wassertiefe  $h$  zu Wellenlänge  $\lambda$  weniger als  $h/\lambda = 1/2$  beträgt. In diesem Fall, der als Übergangsbereich zwischen Tiefwasserwellen und Flachwasserwellen bezeichnet wird, werden Orbitalbewegungen im Wasser durch den Boden derart beeinflusst, dass sich Ellipsenbahnen nahe des Bodens ergeben. Flachwasserwellen werden durch elliptische Orbitalbewegungen des Wassers über die gesamte Wassersäule gekennzeichnet und treten unterhalb von  $h/\lambda = 1/20$  auf. Zur Erzeugung von Wellen im Übergangs- und Flachwasserbereich wurde ein in Abb. 3 beschriebener Piston-Type Wellenerzeuger installiert. Der Antrieb des Erzeugers erfolgt über eine Lineartraverse, wobei die Traversiergeschwindigkeit jeweils konstant über den Fahrweg war.

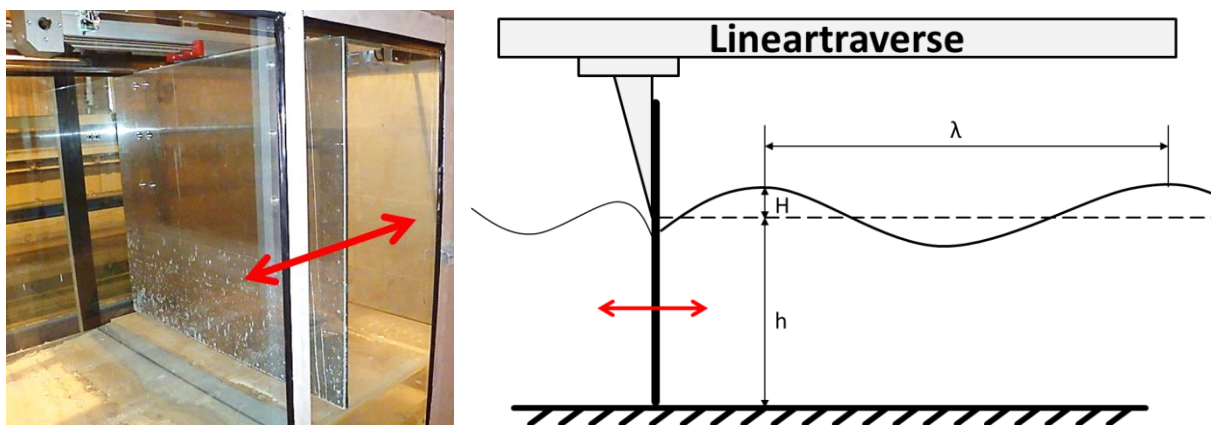


Abb. 3: Wellenerzeuger im Wasserkanal (links) sowie dessen Funktionsprinzip (rechts)

Die somit erzeugten Wellen entsprechen weitgehend der linearen Wellentheorie nach Airy (1845) und Laplace (1776), wobei der Wellenerzeuger Flachwasserwellen erzwingt, welche sich im weiteren Verlauf den Randbedingungen im Wasserkanal anpassen. Die verwendeten Parameter sind in Tab. 1 aufgelistet.

Tab. 1: Versuchsparameter

	Welle 1	Welle 2
Wellenlänge $\lambda$ / m	0,45	3,8
Wellenamplitude $H$ / m	0,035	0,0525
Wellenperiode $T$ / s	0,9	2,5
Wassertiefe $h$ / m	0,29	0,29
$h/\lambda$	0,65	0,076 (ca. 1/13)

Zur Überprüfung der erzeugten welleninduzierten Strömung am Ort des Versuchsobjektes wurden phasenaufgelöste 2-Komponenten-LDA-Messungen durchgeführt. Die maximalen Geschwindigkeitsamplituden sind in Abb. 4a und Abb. 4b über die dimensionslose Wassertiefe  $z/d$  aufgetragen. Die horizontale Geschwindigkeitskomponente  $u$  ist hier jeweils in schwarz dargestellt. Vergleicht man die Messdaten mit den Berechnungen nach der linearen Wellentheorie für eine Welle im Übergangsbereich ( $1/2 > h/\lambda > 1/20$ ), so ergeben

sich die als gestrichelte Linien eingezeichneten Verläufe. Die Messergebnisse verdeutlichen, dass die erzeugte Welle 1 nicht der Theorie einer Tiefwasserwelle entspricht, sondern starke Ähnlichkeit zu den Geschwindigkeitswerten aufweist, die bei einer äquivalenten Flachwasserwelle nach der linearen Wellentheorie zu erwarten sind. Sie sind in Abb. 4a und Abb. 4b als dünn gepunktete Kurven eingezeichnet. Ursächlich hierfür ist die Wahl des Wellengenerators, welcher für die Erzeugung von Flachwasserwellen optimiert ist. Erst bei größeren Lauflängen sollten sich Tiefwasserwellen-Geschwindigkeitsprofile einstellen. Welle 2, welche rechnerisch einer Übergangswelle entspricht ist in Abb. 4a zu sehen und entspricht der Theorie für eine Flachwasserwelle. Für die geplanten Versandungsversuche im Versuchskanal des Ism kann demnach von Flachwasserwellen ausgegangen werden. Die konzipierte Versuchsanlage ist zur Erzeugung von Flachwasser- und Übergangswellen gut geeignet. Somit sind auch im recht kurzen Versuchskanal Realfälle von Versandungen mit sehr geringem Verhältnis von Wassertiefe zu Wellenlänge bei verhältnismäßig großer Wassertiefe simulierbar.

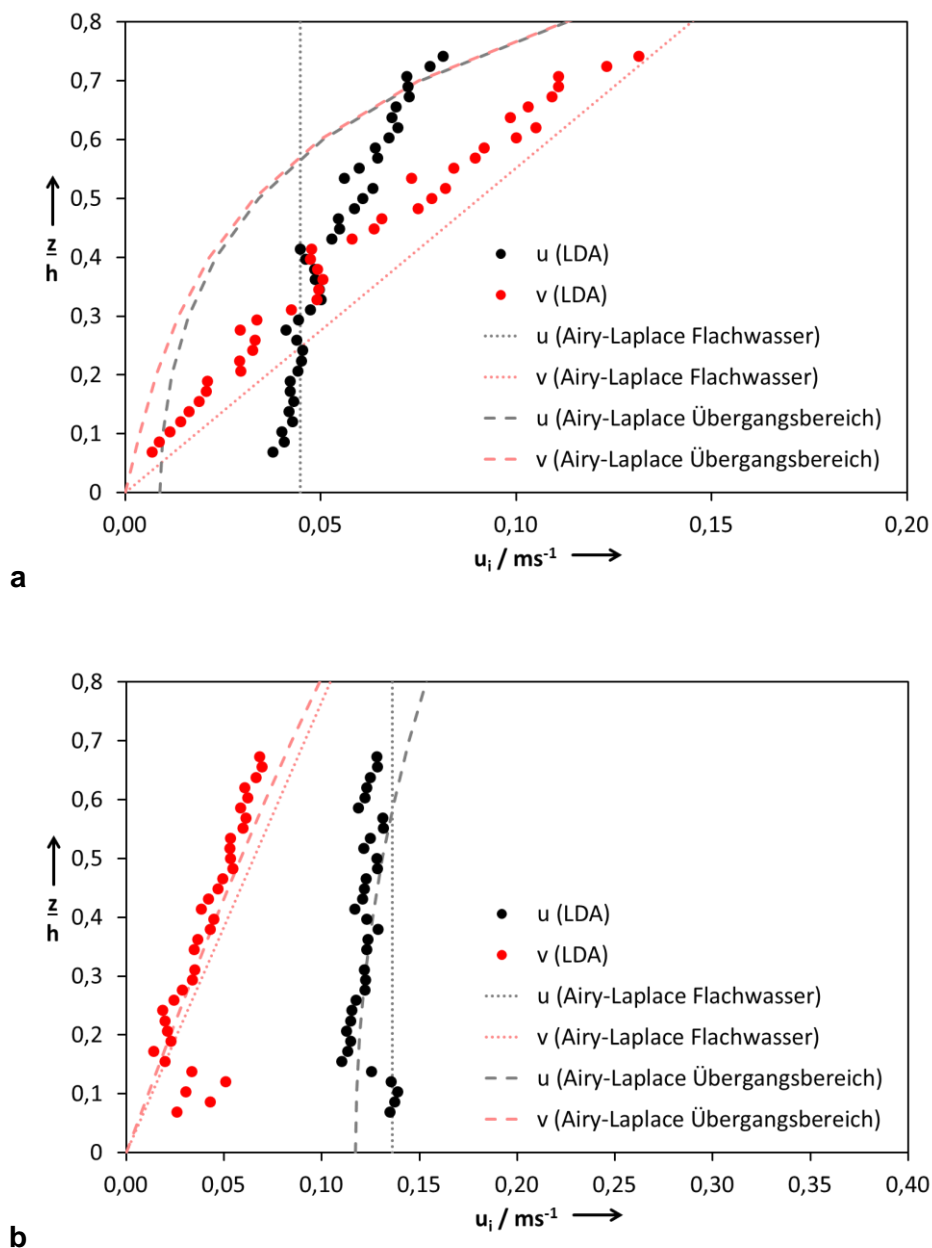


Abb. 4: vertikale Verteilung der horizontalen ( $u$ ) und vertikalen ( $v$ ) Geschwindigkeitskomponenten für Welle 1 (a) und Welle 2 (b).

Neben der Erzeugung von Wellen ist im Versuchskanal auch die Absorption der Wellen am Ende der Messstrecke von großer Bedeutung. Hierzu wurde ein modulares Absorbersystem entwickelt und getestet. Neben einem maximalen Absorptionsvermögen galt es, eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche sowie ein möglichst naturähnliches Rückströmverhalten am Boden zu erreichen. Als Basis für den Wellenabsorber dient der in Abb. 5c dargestellte keilförmige Einsatz für den Versuchskanal, welcher etwa 5 cm oberhalb des Kanalbodens installiert wird. Der Neigungswinkel wurde hierbei unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Baulänge mit 13 Grad möglichst klein gewählt. Als Basisvariante kann der Absorber wie in Abb. 5c mit einer geneigten Platte versehen werden. Zur Verbesserung des Absorptionsvermögens ist weiterhin eine in Abb. 5b schematisch dargestellte Schüttung mit Schaumstoffteilchen möglich, welche eine möglichst fraktale Struktur erzeugt und somit eine optimale Verteilung der Wellenenergie im Absorbervolumen sowie einen zeitlich verzögerten Abfluss des Wellenberges nach unten gewährleisten soll. Um die Schaumstoffteile im Absorber zu halten, wurde dieser mit einem Gitter umgeben. Aufgrund des hohen Auftriebs der Schaumstoffteile und der vergleichsweise geringen Formstabilität des Gitters, dessen Drahtstärke aus strömungsmechanischen Gründen auf 1,5 mm beschränkt war, kann keine absolut plane Oberfläche der Schräge gewährleistet werden. Als dritte, möglichst reproduzierbare Bauform kann der Absorber, wie in Abb. 5a gezeigt, mit quer zur Wellenfront angeordneten Steckblechen versehen werden, welche vorrangig die Wellenberge komplett absorbiert und eine verzögerungsfreie, oszillierende Rückströmung am Kanalboden erzeugt. Eine Kombination der unterschiedlichen Bauformen ist ebenfalls möglich. Zur Bestimmung des Absorptionsvermögens sowie zur Analyse der Wellen wurden Aufnahmen mit einer Videokamera durchgeführt. Eine Beispielaufnahme der mit einer Bildwiederholrate von 60 Hz aufgenommenen Bilder ist in Abb. 6 zu sehen.

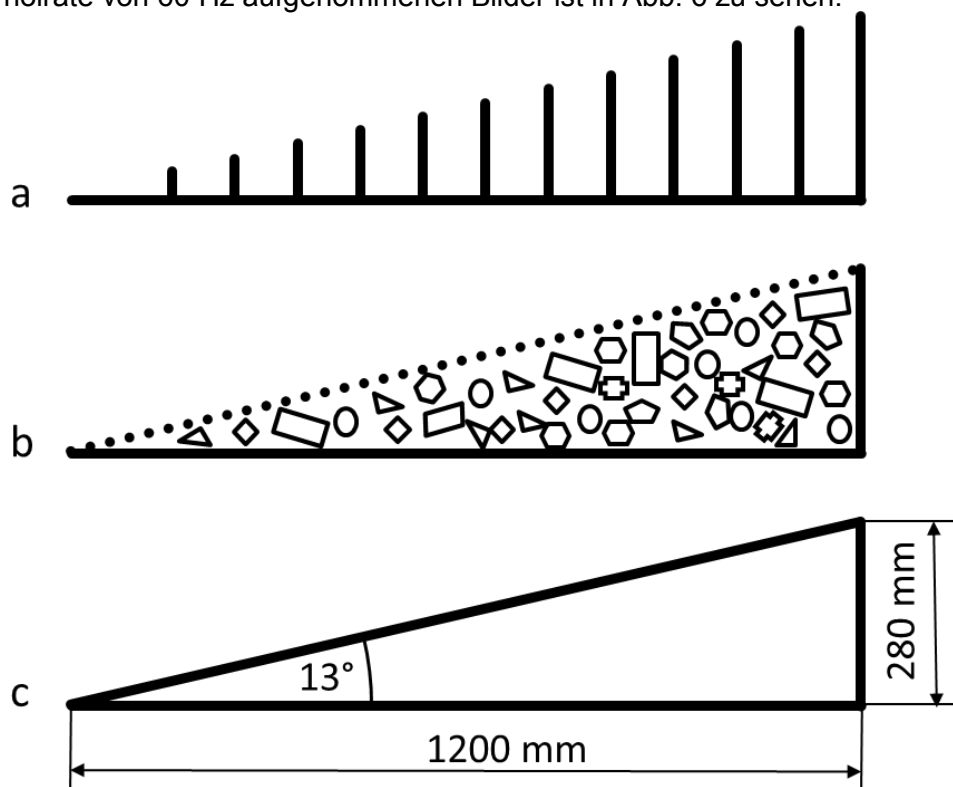


Abb. 5: modulares Wellenabsorbersystem

An den eingezeichneten vertikalen Schnittlinien im Abstand von 37 cm zueinander, siehe Abb. 6, wurden Zeitreihen der Belichtungsintensität extrahiert und die vertikale Position der Wasseroberfläche bestimmt. Das ebenfalls in Abb. 6 dargestellte Diagramm zeigt den zeitlichen Verlauf der Grauwertverteilung auf einer der vertikalen Schnittlinien.

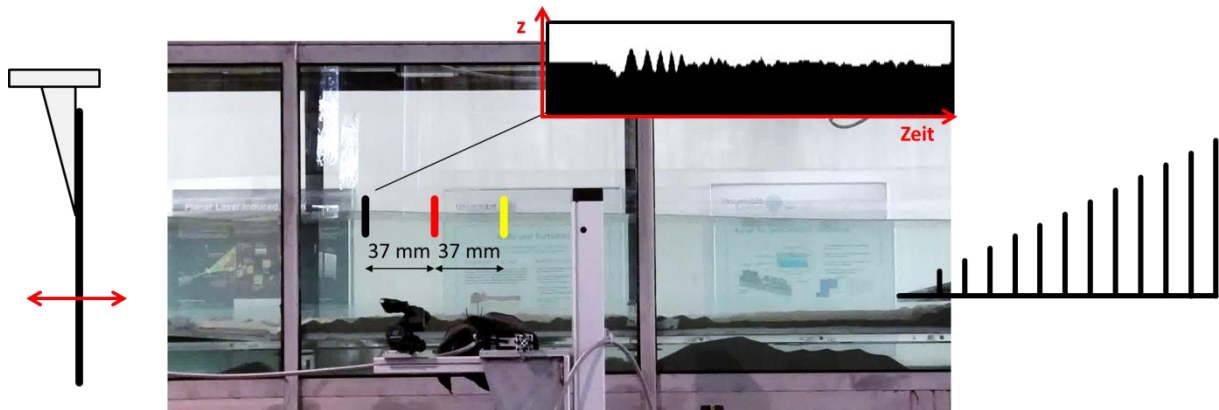


Abb. 6: Messpositionen im Wasserkanal

Abb. 7a zeigt exemplarisch den zeitlichen Verlauf der Oberflächenelongation an den in Abb. 6 schwarz bzw. rot gekennzeichneten Positionen für eine einzige erzeugte Welle 2. Der zeitliche Verlauf zeigt jeweils einen Wellenberg sowie einige Schwingungen nach Durchlauf des Wellenberges. Das Nachschwingen deutet auf Reflexionen sowie höhere Moden bei der Wellenerzeugung hin. Zur genaueren Analyse wurde eine Kreuzkorrelation zwischen beiden Signalen durchgeführt, welche exemplarisch in Abb. 7b zu sehen ist. Deutlich wird das Maximum, welches die Bewegungsrichtung der Welle vom Erzeuger zum Absorber kennzeichnet und auf die Fortschrittsgeschwindigkeit der Welle schließen lässt. Extrapoliert man diese Fortschrittsgeschwindigkeit auf die Gesamtlänge des Kanals, so findet man links des Maximums die rücklaufende Welle. Das Verhältnis der Korrelationskoeffizienten für die rücklaufende Welle zur hinlaufenden Welle wurde nunmehr als Maß für die Qualität des Absorbers verwendet.

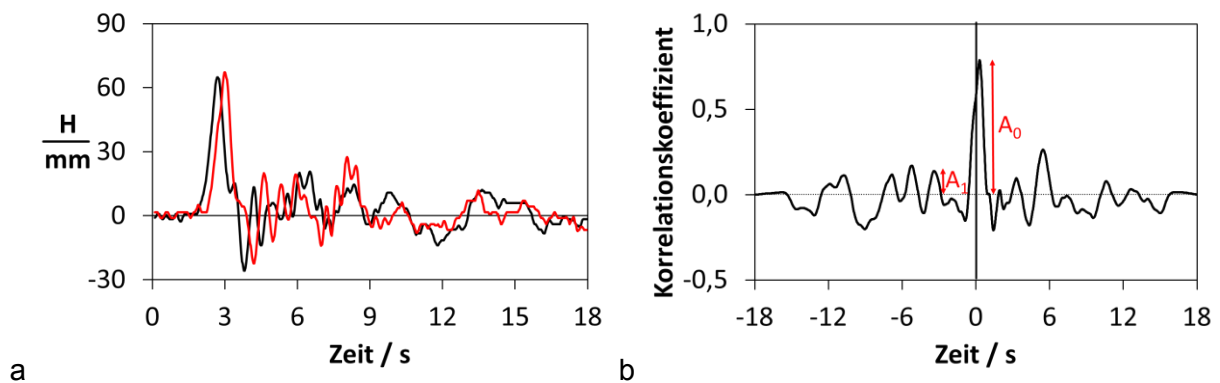


Abb 7.: Zeitlicher Verlauf der Wellenhöhe an zwei unterschiedlichen Positionen im Kanal (a) sowie Kreuzkorrelation zwischen beiden Signalen (b) für Welle 2

Bei der Auswahl des Absorbertyps wurden lediglich die in Abb. 5a und Abb. 5b aufgezeigten Absorbervarianten in Betracht gezogen. Zur Absicherung der Ergebnisse wurden für jeden Wellen- bzw. Absorbertyp jeweils fünf Einzelmessungen durchgeführt und die Ergebnisse jeweils gemittelt. Eine Gegenüberstellung der Ergebnisse erfolgt in Tab. 2, wonach die reflektierten Wellen bei dem mit Schaumstoffteilen gefüllte Absorber nur geringfügig schwächer nachzuweisen sind als beim Plattenabsorber. Aufgrund des geringen Unterschiedes zwischen den Ergebnissen beider Absorber und der bereits erwähnten Nachteile des Schaumstoffabsorbers hinsichtlich der Reproduzierbarkeit und numerischen Abbildbarkeit wurde entschieden, für alle weiteren Versuchsexperimente den Plattenabsorber zu verwenden.

Tab. 2: Gegenüberstellung der Dämpfungsergebnisse der Absorber

$A_1/A_0$	Welle 1	Welle 2
Schaumstoffabsorber	0,14	0,11
Plattenabsorber	0,15	0,17

### Zylinderversandung unter Einfluss von Oberflächenwellen

Zur Untersuchung der Versandung eines Zylinderabschnitts unter Einfluss von Oberflächenwellen wurde ein Zylinder mit einem Durchmesser von  $D = 59 \text{ mm}$  sowie einer Länge von  $L = 190 \text{ mm}$  mit seiner Zylinderachse parallel zu den Wellenfronten in der Mitte des Versuchskanals positioniert. Deutlich zu erkennen ist die Ausbildung von symmetrischen Rippelstrukturen. An den Zylinderenden kommt es, ähnlich wie im Fall einer zeitlich konstanten Anströmung, zur Erosion von Sediment, während der Kolkgraben vor dem Zylinder nun nicht mehr auffindbar ist. Trotzdem kommt es zur Versandung des Zylinders infolge der Erosion von Sediment unterhalb des Objektes, insbesondere in den beiden Endbereichen. Im Gegensatz zum Fall zeitlich konstanter Anströmung vollzieht der Zylinder keine Rollbewegung, sondern ausschließlich eine translatorische Bewegung in Richtung der Gravitationskraft. Ebenso wie im Falle der gleichmäßigen Anströmung tritt eine deutliche Bewegung nur innerhalb eines kurzen Zeitraums auf. Abb. 8 zeigt die Boden- und Versandungsstrukturen zu Beginn der Messung sowie nach 143 Minuten unter Einfluss von Welle 2.

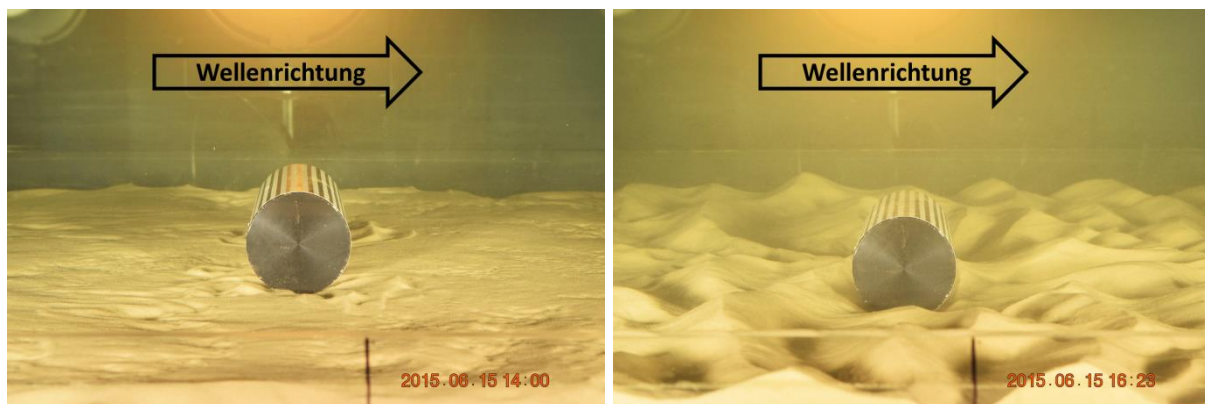


Abb. 8: Versandungsstrukturen zu Beginn der Messung sowie nach 143 min bei Welle 2

Nach 143 Minuten wurde die Messung abgebrochen, da visuell keine Bewegung des Zylinders mehr sichtbar war. Der Endzustand nach dieser Zeit ist in Abb. 9 aus unterschiedlichen Perspektiven festgehalten. In Abb. 9b und Abb. 9c sind Erosionsgebiete im Bereich der Zylinderenden zu sehen, welche sich auch entlang der Mantelfläche in Richtung Zylindermittle ziehen. In der Zylindermittle bleibt beidseitig ein kleines Akkumulationsgebiet erhalten. Abb. 9a lässt erkennen, dass es in Wellenrichtung hinter dem Zylinder eine Asymmetrie in Form von zwei Rippelbergen mit Ausrichtung der Kämme in Wellenrichtung gibt. Der Grund hierfür ist in der Asymmetrie der Orbitalbewegungen der Welle zu finden, welche einen Netto-Sedimenttransport in Wellenrichtung hervorruft. Dieser Effekt konnte auch in Form einer Rippelwanderung beobachtet werden. Abb. 9a und Abb. 9d zeigen, dass die Rippelstrukturen im direkten Umfeld des Zylinders deutlich „ungeordneter“ als im Zu- und Abströmgebiet ausgebildet sind. Im Fernfeld ist eine deutliche Ausrichtung der Rippelkämme parallel zu den Wellenfronten auszumachen (siehe Abb. 9d).

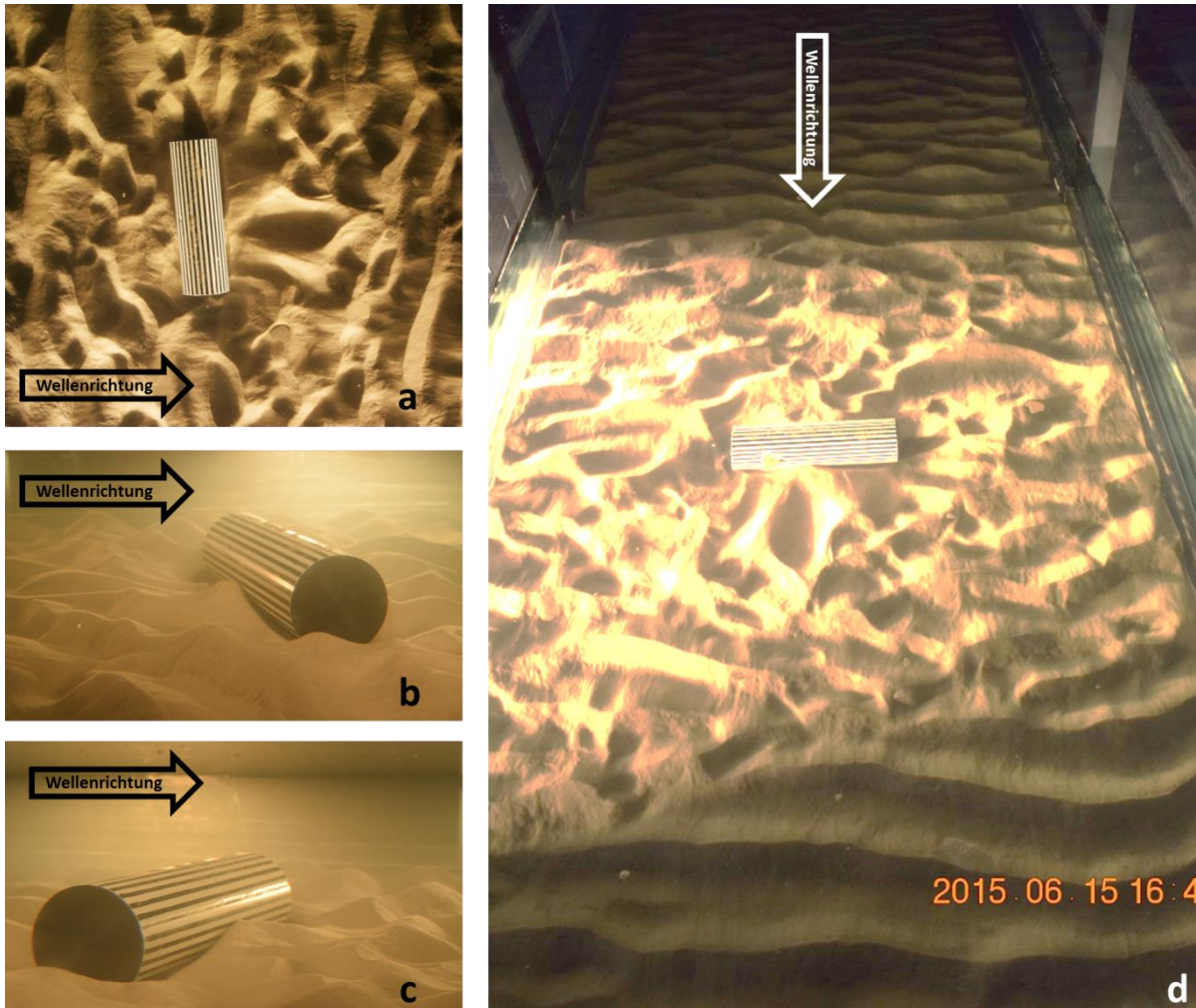


Abb. 9: Versandungsstrukturen nach 143 min bei Welle 2

Bei den Messungen unter zeitlich konstanter Anströmung wurde beobachtet, dass die gleichmäßigen Rippelstrukturen vor im Zylindernachlauf ebenfalls zerstört wurden. Nutzt man die lineare Wellentheorie für Flachwasserwellen, so erhält man am Boden für Welle 2 eine horizontale Strömungsgeschwindigkeit von bis zu 0,27 m/s. Für die horizontale Bewegung in der Orbitalbahn am Boden ergibt sich eine Weglänge von 0,21 m. Offenbar reichen die durch die Umströmung des Objektes am Boden verursachten Störungen jeweils etwa 21 cm in beide Richtungen vor bzw. hinter den Zylinder, was den Beobachtungen in Abb. 9d entspricht.

### Zusammenfassung

Der Wasserkanal des Ism wurde mit einem Piston-Type Wellenerzeuger sowie einem modularen Wellenabsorbersystem ausgerüstet. In den Untersuchungen konnten erste Ergebnisse zum Versandungsverhalten zylindrischer Objekten am Meeresboden unter Einfluss von Oberflächenwellen erzielt werden.

Durch Videoanalysen konnte das Wellenabsorptionsvermögen zweier Absorbersysteme bestimmt werden, woraufhin ein geeigneter Plattenabsorber für die Versandungsversuche ausgewählt werden konnte.

Mit Hilfe phasengemittelter LDA-Messungen konnten die vertikalen Geschwindigkeitsprofile zweier unterschiedlicher Wellen vermessen werden. Es konnte festgestellt werden, dass ein Piston-Type Wellenerzeuger geeignet ist, Flachwasserwellen sowie Wellen im Übergangsbereich zu erzeugen.



In einem ersten Versandungsversuch unter Einfluss einer Übergangswelle konnte eine starke Rippelbildung beobachtet werden, welche den Erwartungen entspricht. Die Versandung eines zylindrischen Objektes konnte nachgewiesen werden. Im Gegensatz zur Versandung unter zeitlich konstanter Anströmung führt der Zylinder unter Welleneinfluss keine Rotationsbewegung, sondern lediglich eine vertikale Translation in Richtung der Gravitationskraft durch. Der Einflussbereich des Zylinders auf die Rippelstrukturen tritt im welleninduzierten Versandungsversuch vor sowie hinter dem Zylinder in Erscheinung. Er erstreckt sich auf den durch die horizontale Bewegungskomponente der Orbitalbahn abgedeckten Bereich vor und hinter dem Zylinder.

## 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.

Weiterer Dank gilt den Kollegen am Ism sowie den Studenten Frau Nimz und Herrn Bestier.

## Literatur

Airy, G.B., (1845). Tides and Waves, Encyclopedia Metropolitana, §192: 241-496.

Laplace, P.-S.M.d., (1776). Suite des récherchessur plusieurs points du système du monde (XXV-XXVII). M'm. Présentés Divers Savans Acad. R. Sci. Inst. France, pp. 525-52 (Sur les Ondes, pp. 542-52).

Menzel, P., (2010). Turbulente Mischungsvorgänge im Nachlauf einer dichtegeschichteten Zylinderumströmung. Ostseebad Kühlungsborn: Dissertation an der Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, MENZEL-Verlag.

Menzel, P. & Leder, A., (2011). Laboruntersuchungen zur Versandung von Objekten am Meeresboden. In A., T. et al., eds. Proceedings der 19. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik" 6.-8. September 2011. Illmenau, 2011. ISBN: 978-3-9805613-7-2.

Menzel, P. & Leder, A., (2013). Kolkbildung im Umfeld zylindrischer Objekte sowie deren Versandung im Wasserkanalexperiment. In Kächler, C.J. et al., eds. Proceedings der 21. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 3.-5. September 2013. Universität der Bundeswehr München, 2013. ISBN 978-3-9805613-9-6, ISSN 2194-2447.

Menzel, P., Rückborn, T. & Leder, A., (2013). Flow and scour around cylindrical objects in laboratory experiments. MTS/IEEE, DOI: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607970.

Menzel, P., Witte, M. & Leder, A., (2012). Windkanalexperimente zur Bestimmung der Strömungsstrukturen um einen quer zur Anströmung auf einer Bodenplatte lagernden Zylinderabschnitt. In Leder, A., Brede, M., Ruck, B. & Dopheide, D., eds. Proceedings der 20. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik" 4.-6. September 2012. Universität Rostock, 2012. ISBN 978-3-9805613-8-9, ISSN 2194-2447.

Wilkens, R.H. & Richardson, M.D., (2007). Mine Burial Prediction: A Short History and Introduction. IEEE Journal of Oceanic Engineering, January. pp.3-9.