

Migration von Munitionsaltlasten am Meeresboden

P. Menzel, H. Wranik, M. Paschen

Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik
Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

Motivation

Die Präsenz von Kampfmitteln aus dem 1. und 2. Weltkrieg in küstennahen Gewässern stellt für Bauaktivitäten offshore eine Bedrohung dar. Hierzu werden im Vorfeld solcher Bauaktivitäten Kampagnen zur Auffindung von Kampfmitteln durchgeführt. Die detektierten Objekte werden dann Anhand von Risikoanalysen eingestuft und entsprechend ihrer Risiko-bewertung entfernt. Bisher wurde davon ausgegangen, dass der beräumte Bereich aufgrund einer möglichen Verlagerung der Objekte nur für einen begrenzten Zeitraum als risikolos betrachtet werden kann. Aktuelle Studien jedoch zeigen, dass eine zeitliche Freigabe der beräumten Flächen wenig sinnvoll ist.

Die Verlagerung der Objekte kann durch die an deren Oberfläche wirkenden hydrodynamischen Kräfte verursacht werden. Die hydrodynamischen Belastungen sowie die mit der Kolk-, Dünen- und Rippelbildung einhergehenden Prozesse gelten nach dem heutigen Stand wissenschaftlicher Erkenntnis als die maßgeblichen Ursachen. Aus heutiger Sicht ist zu konstatieren, dass zuverlässige Voraussagen von Versandungs- und Verlagerungsabläufen allein auf der Basis numerischer Modelle nur schwer, vielleicht auch gar nicht möglich sind.

Zur Vorhersage einer möglichen Verlagerung von Munitionsaltlasten am Meeresboden wurden Laborexperimente im Wasserkanal sowie im Windkanal durchgeführt. Numerische Simulationen ergänzen diese Untersuchungen. Als Ergebnis der Untersuchungen wurde ein Modell zum strömungsinduzierten Bewegungsbeginn von Objekten am Meeresboden entwickelt, verallgemeinert und validiert. Dieses Modell ermöglicht die Vorhersage des Bewegungsbeginns unterschiedlicher Objektklassen in Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit und der Versandungstiefe.

Stand der Forschung und Vorarbeiten

Um eine mögliche Verlagerung von Objekten am Meeresboden vorhersagen zu können, ist es notwendig, die Strömungsstrukturen um diese Objekte, deren mögliche Versandungszustände und die auf die Objekte wirkenden hydrodynamischen Kräfte zu kennen. In Wilkens & Richardson (2007) wird gezeigt, dass die teilweise Versandung von Objekten am Meeresboden von unterschiedlichen Effekten hervorgerufen wird und von einer Vielzahl an Parametern abhängt, wie sie z.B. in Jenkins et al. (2007) aufgeführt wurden. In diesem Zusammenhang kann zwischen Prozessen im Nahfeld eines Objektes und Fernfeldprozessen unterschieden werden. Die Fernfeldprozesse wie die Bodenveränderung durch ein Gefälle, Rippel oder Dünen aber auch eine Bodenverflüssigung hängen nicht von der Anwesenheit des Objektes selbst ab, was z.B. in Cantañó-Lopera et al. (2007), Jenkins et al. (2007) und Wilkens & Richardson (2007) dargestellt wurde. Im Gegensatz hierzu werden die Prozesse im Nahfeld eines Objektes durch das Objekt selbst, dessen Umströmung und die Interaktion des Objektes mit seiner Umgebung, inklusive des umgebenden Sedimentes, hervorgerufen, was ebenfalls in Jenkins et al. (2007) beschrieben wird. Der wichtigste Nahfeldprozess ist die Kolkbildung, welche von einer Vielzahl an

Parametern und Randbedingungen abhängt, welche z.B. in Wilkens & Richardson (2007), Jenkins et al. (2007), Shields (1936) und Guyonic et al. (2007) beschrieben wurden.

Seit einiger Zeit werden an der Universität Rostock Untersuchungen zur Kolkbildung und zur Versandung von minenähnlichen Objekten am Meeresboden durchgeführt. Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden, wie in Menzel & Leder (2013) und Menzel & Leder (2014) gezeigt, die charakteristischen Erosions- und Akkumulationsgebiete für Sediment im Umfeld dieser Objekte bestimmt, charakterisiert und quantifiziert. Hierzu wurden Windkanaluntersuchungen unter Einhaltung der Reynoldszahl durchgeführt, um die charakteristischen Strömungs-, Wirbel- und Turbulenzstrukturen im Umfeld der Objekte zu bestimmen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen wurden herangezogen, um die aero- und hydrodynamischen Kräfte auf einen unter verschiedenen Anströmwinkeln am Meeresboden lagernden Zylinderabschnitt zu bestimmen. Das sich hieraus ergebende Munk-Moment führt dazu, dass die Objekte dazu tendieren, sich mit ihrer Zylinderachse normal zur

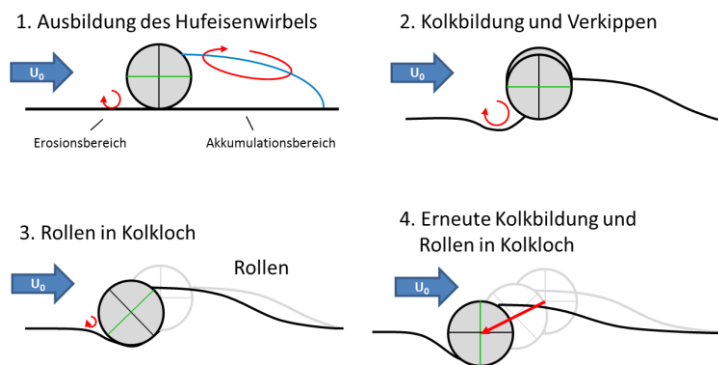


Abb. 1: Modell des Versandungsvorgangs eines zylindrischen Objektes am Meeresboden.

Anströmrichtung auszurichten. Laborexperimente im Wasserkanal zeigten, dass trotz niedrigerer Reynoldszahl ähnliche Wirbel- und Turbulenzstrukturen sowie eine vergleichbare Lage der Ablöselinie auftreten. Demnach sind die Ergebnisse aus dem Wasserkanal mit denen im Windkanal und im Realfall vergleichbar. In Menzel & Leder (2013) konnte gezeigt werden, dass der Hufeisenwirbel vor dem Objekt ursächlich für die Kolkbildung an diesem Ort und die teilweise Versandung der Objekte

ist, während der Bogenwirbel im Rezirkulationsgebiet für die Akkumulation von Sediment im Nachlauf eines Objektes verantwortlich ist (siehe Abb. 1). Die maximale Versandungstiefe wurde in Menzel & Leder (2013) mit $z/D = 0,8$ angegeben, wobei D den Durchmesser eines am Meeresboden quer zur Anströmung lagernden Zylinderabschnitts beschreibt. Es wurde ebenfalls gezeigt, dass die maximale Versandungstiefe unter gleichmäßiger Anströmung, unter Einfluss von Oberflächenwellen und unter dem Einfluss von Gezeiten jeweils den gleichen Wert annimmt.

Modell

Entsprechend des Versandungsmodells aus Abb. 1 ist von einer Migration minenähnlicher Objekte am Meeresboden entgegen der Anströmrichtung auszugehen. Diese Bewegung lässt sich in eine vertikale Bewegung, welche mit maximal $z/D = 0,8$ angegeben wurde, und eine horizontale Bewegung unterteilen. Es ist zu konstatieren, dass die horizontale Bewegung, ebenso wie die vertikale Bewegung, stark begrenzt ist. Eine Verlagerung der Objekte über größere Distanzen ist aufgrund dieses Effektes somit nicht möglich. Da die für die Kolkbildung im Bereich des Hufeisenwirbels notwendige kritische Strömungsgeschwindigkeit im Ozean in den meisten Seegebieten der Nordsee mit einer hohen Wahrscheinlichkeit mehrmals im Jahr überschritten werden kann, ist davon auszugehen, dass Objekte, die bereits seit vielen Jahren auf sandigem Boden lagern, inzwischen zu einem Großteil partiell versandet sind. Aus dieser Annahme und dem in Abb. 1 gezeigten Versandungsmodell lässt sich ein Modell für den strömungsinduzierten Bewegungsbeginn eines zylindrischen Objektes am Meeresboden in Strömungsrichtung ableiten. Demnach ist die Grundvoraussetzung für eine derartige Bewegung das Überschreiten des Kräftegleichgewichtes aus den hydrodynamischen Kräften auf das Objekt zu den Gravitations- und Auftriebskräften, um dieses aus dem teilweise versandeten Zustand zu befreien. Hierzu muss das Objekt angehoben bzw. über den stromab liegenden Kontaktpunkt mit dem Sediment gedreht werden. Vereinfachend wird davon ausgegangen,

dass der statische Druck auf der Unterseite des Objektes einen endlichen Wert annimmt. Somit wird zwar der hydrostatische Auftrieb berücksichtigt, die Saugwirkung des Objektes am Meeresboden jedoch vernachlässigt. Durch diese Vereinfachung werden die Haltekräfte auf das Objekt zu klein abgeschätzt, womit die für einen Bewegungsbeginn kritische Geschwindigkeit zu niedrig bestimmt wird. Ein vereinfachtes Modell der am Zylinder angreifenden Kräfte findet sich in Abb. 2. Hierbei ergibt sich die Gewichtskraft

$$\vec{F}_g = m_0 \cdot \vec{g} \quad [1]$$

aus der Masse des Objektes in Luft m_0 und der Gravitationsbeschleunigung g . Die Auftriebskraft

$$\vec{F}_b = -V_0 \cdot \rho_w \cdot \vec{g} \quad [2]$$

ist durch die Masse des verdrängten Wasservolumens $V_0 \cdot \rho_w$ gegeben und wirkt entgegen der Gewichtskraft. Die korrigierte Gewichtskraft beträgt dementsprechend

$$\vec{F}_0 = \vec{F}_g + \vec{F}_b \quad [3]$$

und wirkt für nicht schwimmende Objekte nach unten. Unter Berücksichtigung des Objektradius $r = D/2$ mit dem Objektdurchmesser D kann das Moment

$$\vec{M}_0 = \vec{r}_0 \times \vec{F}_0 \quad [4]$$

mit der Kraft \vec{F}_0 normal zum Radiusvektor \vec{r}_0 bestimmt werden. Der Radiusvektor \vec{r}_0 beschreibt den Vektor vom Drehpunkt zum Mittelpunkt des Zylinders. Die Lage des Drehpunktes wird hierbei durch die Formkontur und die Versandungstiefe des Objektes z_b/D definiert. Das Moment \vec{M}_0 wird maximal für Versandungstiefen von $z_b/D = 0.5$ und geht gegen Null für $z_b/D = 0$.

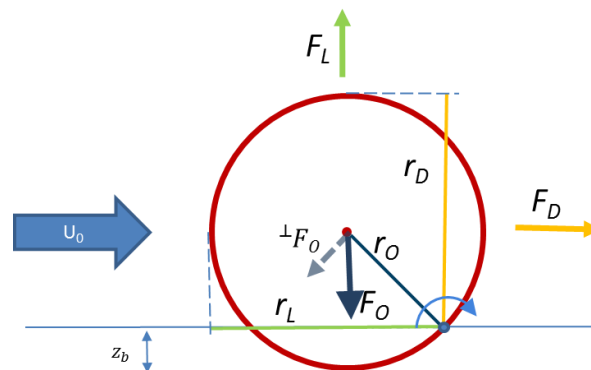


Abb. 2: Kräfte und Maße an einem zylindrischen Objekt.

Aus der Anströmung des Objektes mit der Anströmgeschwindigkeit U_0 ergibt sich die Widerstandskraft

$$\vec{F}_D = \frac{\rho_w}{2} \cdot |\vec{U}_0| \cdot \vec{U}_0 \cdot c_D \cdot A_D, \quad [5]$$

wobei A_D die der Strömung ausgesetzte Querschnittsfläche des teilweise versandeten Objektes beschreibt. Die Auftriebskraft

$$\vec{F}_L = \frac{\rho_w}{2} \cdot |\vec{U}_0| \cdot \vec{U}_0 \cdot c_L \cdot A_L. \quad [6]$$

Hingegen wird mit der Querschnittsfläche A_L des gesamten Objektes in der Draufsicht gebildet. Geht man nun davon aus, dass diese Kräfte an einem maximalen Hebelarm angreifen, so erhält man eine worst-case Annahme und ein resultierendes Moment

$$\overline{M_{DL}^*} = \overline{r_D} \times \overline{F_D} + \overline{r_L} \times \overline{F_L}. \quad [7]$$

Diese Annahme wurde für Kraftmessungen im Windkanal angewendet. Dieser Ansatz stellt eine sehr grobe Vereinfachung dar. Kennt man die Kräfteverteilung auf der Objektoberfläche genauer, so kann man es als Summe aller Oberflächenkräfte wie folgt schreiben:

$$\overline{M_{DL}} = \sum_n \overline{r_n} \times \perp \overline{F_n}, \quad [8]$$

was in Abb. 8 schematisch dargestellt ist. Das Gleichgewichtsmoment zwischen strömungsinduziertem Moment und Objektmoment wird als kritisches Moment bezeichnet. Sobald dieses kritische Moment überschritten wird, kann das Objekt angehoben und in Bewegung versetzt werden.

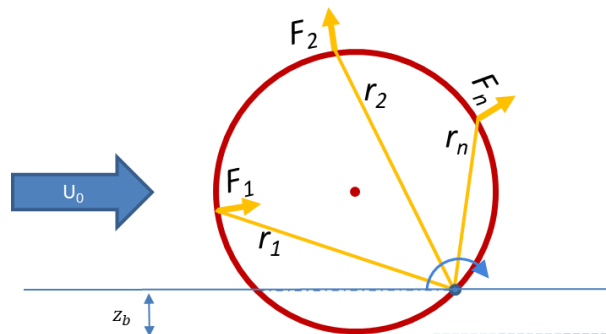


Abb. 3: Kräfte und Maße an einem zylindrischen Objekt.

Die Hauptaufgabe der Untersuchungen war es, die strömungsmechanischen Kräfte zu quantifizieren, die auf unterschiedliche Objekte in unterschiedlichen Versandungstiefen bei diversen Anströmgeschwindigkeiten wirken. Dabei wurden Wellen, Gezeiten und die Durchströmung des Sediments vernachlässigt. Das im Ozean auftretende turbulente Geschwindigkeitsprofil wurde für die numerischen Simulationen, die Windkanalmessungen und die Wasserkanalexperimente einheitlich vereinfacht, um eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten.

Methoden

Zur Bestimmung der strömungsinduzierten Kräfte auf die unterschiedlichen Objekte wurden Windkanalmessungen am großen Windkanal der Universität Rostock unter Einhaltung der Reynoldszahl durchgeführt. Die Messstrecke des Windkanals hat mit 1,4 m x 1,4 m einen Querschnitt von 2 m² und eine Länge von 2,8 m.

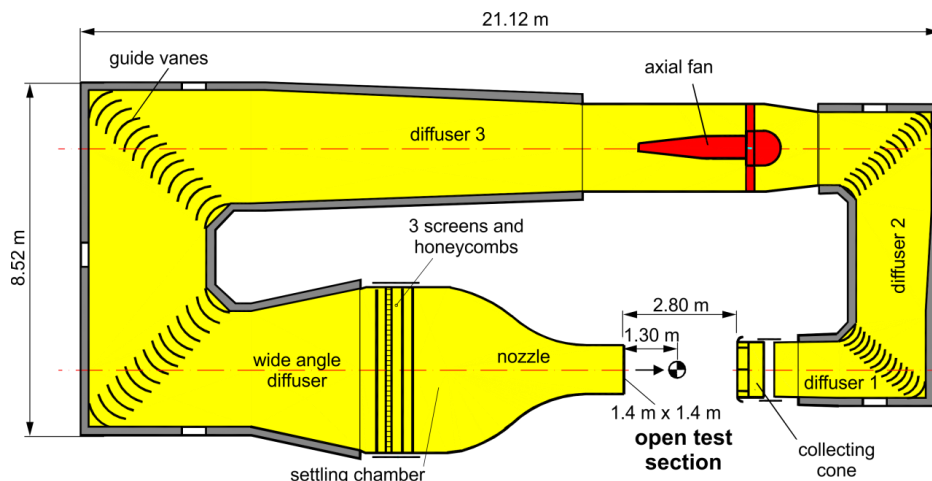


Abb. 4: Großer Windkanal der Universität Rostock.

Die Abmessungen des Windkanals, dessen Aufbau sowie die Position der Kraftmesseinrichtung sind Abb. 4 zu entnehmen. Innerhalb der Messstrecke wurde eine Endplatte zur idealisierten Darstellung des Meeresbodens verwendet (siehe Abb. 5). Um auch bei niedrigen Reynoldszahlen eine turbulente Grenzschicht und somit ein nahezu gleiches Geschwindigkeitsprofil zu erzielen, wurde im vorderen Bereich der Platte ein Stolperdraht mit einem Durchmesser von 1,6 mm installiert. Die 6-Komponenten-Kraftwaage wurde unterhalb der Platte, außerhalb der Messstrecke, befestigt. Der Befestigungspunkt für die Objekte lag hierbei 1300 mm stromab des Düsenausgangs mittig in der Messstrecke. Zur Überprüfung des Geschwindigkeitsprofils wurden Hitzdrahtmessungen durchgeführt.

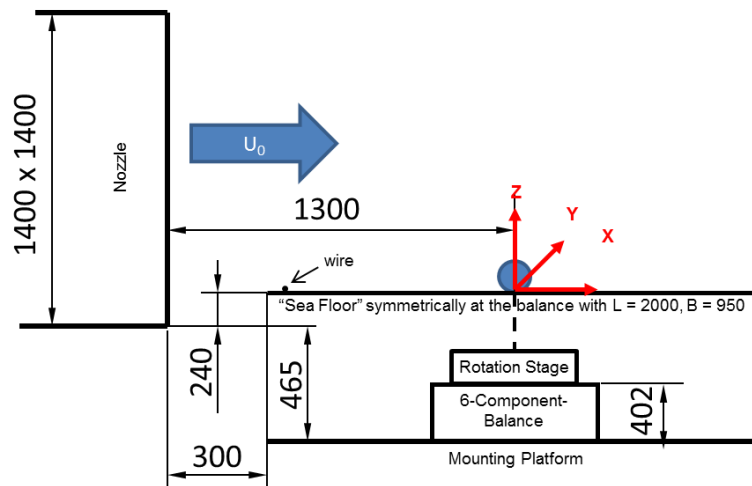


Abb. 5: Skizze der Endplatte und der Kraftwaage in der Messstrecke des Windkanals.

Zur Bestimmung der Oberflächenkräfte auf den Objekten wurden numerische Simulationen mit ANSYS CFX durchgeführt. Hierbei wurden die Methoden RANS und URANS mit einem $k-\omega$ -SST-Modell durchgeführt. Das Rechengebiet wurde automatisch mit unstrukturierten Tetrahedergitter und einer prismatischen Unterschicht vernetzt. Der dimensionslose Wandabstand wurde in allen Simulationen mit $y^+ < 1$ eingehalten. Abb. 6 zeigt das verwendete Rechengebiet und die entsprechenden Randbedingungen. Im Mittel wurden 6 bis 10 Millionen Zellen verwendet.

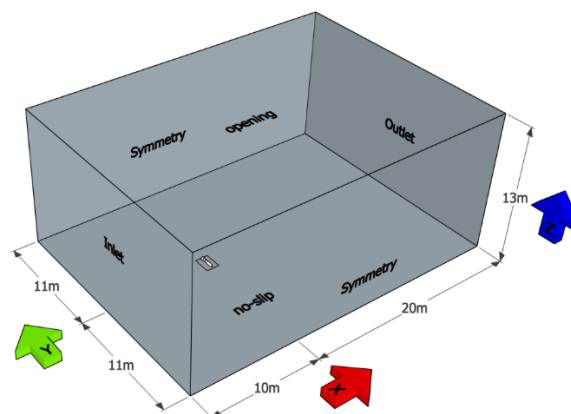


Abb. 6: Rechengebiet und Randbedingungen.

Die Simulationen wurden für den realen Maßstab in Wasser und für den Modellmaßstab in Luft (Windkanalbedingungen) durchgeführt. Hierbei wurden die Simulationen im Modellmaßstab lediglich zur Validierung verwendet.

Zum Nachweis der Anwendbarkeit des Modells wurden Versandungsversuche im Wasserkanal durchgeführt. Der Wasserkanal ist in Abb. 7 dargestellt und wurde z.B. in Menzel (2010) ausführlich beschrieben. Als Sedimentmodell wurde Silikatsand mit einem

Korndurchmesser von $0.1 \text{ mm} < d_p < 0.3 \text{ mm}$ und einer Dichte von $\rho_p = 2600 \text{ kg/m}^3$ verwendet. Das Geschwindigkeitsprofil am Ort des Messobjektes wurde mit Hilfe eines 1D-LDA's überprüft.

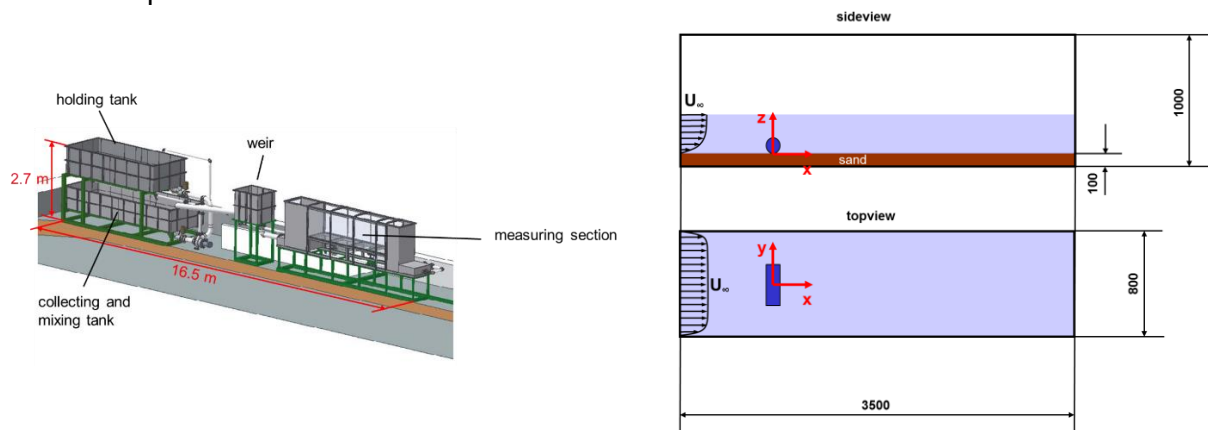


Abb. 7: Wasserkanal und dessen Messstrecke.

Versuchsobjekte

Aufgrund der extrem großen Anzahl unterschiedlicher Munitionstypen, die in der Nordsee zu finden sind, wurde sich im Rahmen dieser Untersuchungen lediglich auf eine Auswahl von Objekten beschränkt, deren Häufigkeit hoch und deren Sprengkraft als besonders stark einzustufen ist. Diese Objekte können massive Schäden an Schiffen verursachen und führen mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Personenschäden. Die Auswahl der in Abb. 8 dargestellten Versuchsobjekte wurde vom Projektpartner getroffen.

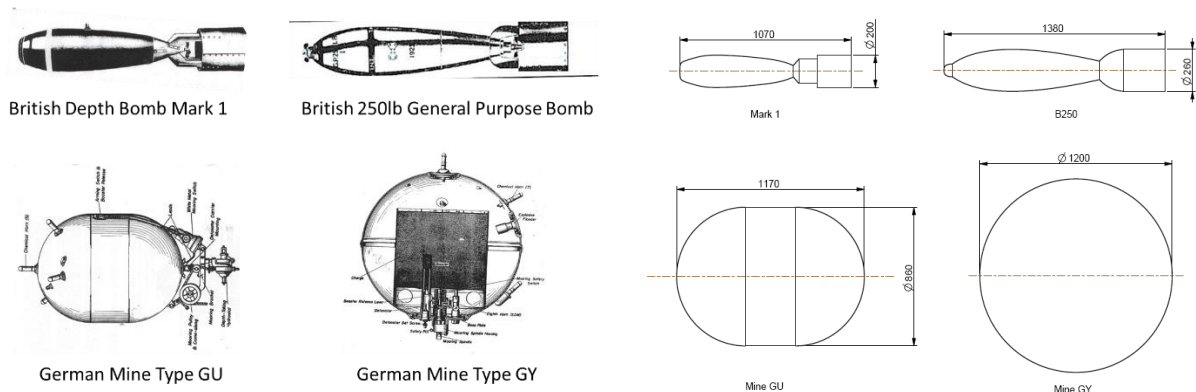


Abb. 8: realistische und vereinfachte Darstellung der Versuchsobjekte.

Aufgrund der zu erwartenden starken Korrosion ist davon auszugehen, dass die kleineren Anbauteile inzwischen nicht mehr in der ursprünglichen Form vorhanden sind. Zur Vereinfachung wurden alle Modelle auf ihre wesentliche Geometrie reduziert dargestellt. Eine signifikante Vereinfachung wurde bei den britischen Bomben vorgenommen. Die hier vorhandenen Ringleitwerke wurden als Vollzylinder dargestellt. Hierdurch erhöht sich die Auftriebskraft, da die Gesamtmasse unverändert bleibt, das Volumen jedoch steigt. Der Einfluss dieser Vereinfachung auf die hydrodynamischen Kräfte kann als eher gering angenommen werden. Somit ist zu erwarten, dass die kritische Geschwindigkeit wiederum als zu niedrig berechnet wird, was erneut ein worst-case Szenario darstellt.

Ergebnisse

Die Umströmung aller vier Objekte wurde bei vier unterschiedlichen Versandungstiefen und fünf verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten numerisch simuliert. Die

Windkanalmessungen fanden ebenfalls mit jeweils drei Modellen unterschiedlicher Versandungstiefe bei 10 bis 15 verschiedenen Anströmgeschwindigkeiten statt. Im Wasserkanal wurden die finalen Versandungszustände in live-bed Versuchen erzielt. Hierbei kommt es zur Sedimentverlagerung im gesamten Wasserkanal und zur Ausbildung von Rippelstrukturen. Für den Fall der britischen 250lb General Purpose Bombe sind die Kolk- und Versandungsstrukturen in Abb. 9 dargestellt. Es zeigt sich, dass auch hier die für den Zylinder typischen Strukturen mit einem Erosionsgebiet vor dem Objekt und einem Akkumulationsgebiet in dessen Nachlauf auftreten. Weiterhin kommt es auch hier nicht zu einer vollständigen Versandung. Somit ist das vorgeschlagene Modell zur Bestimmung des strömungsinduzierten Bewegungsbeginns für dieses Objekt anwendbar. Die äquivalenten Untersuchungen an den anderen Objekten zeigten, dass das Modell auch für diese Objekte anwendbar ist.

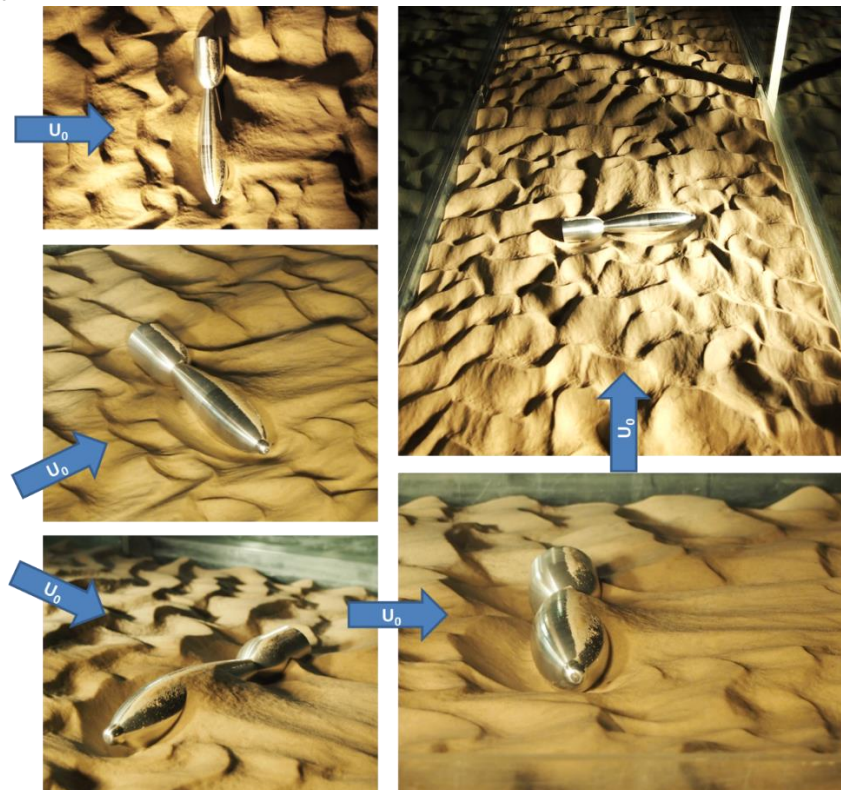


Abb. 9: Bodenstruktur im Umfeld der britischen 250lb General Purpose Bombe.

Die Ergebnisse der Windkanalmessungen und der numerischen Simulationen sind in Abb 10 aufgetragen. Die Auftriebskräfte (links) sind hierbei für eine Versandungstiefe von 50 % dargestellt, während die Widerstandskräfte für alle Versandungstiefen (rechts) aufgetragen sind. Es zeigt sich, dass die Ergebnisse der Windkanalmessungen (Kreuze) und der numerischen Simulationen (Punkte) sehr gut übereinstimmen. Demnach können die numerischen Simulationen zur Erweiterung des Ergebnisraums herangezogen werden. Es zeigt sich außerdem, dass die Ergebnisse der beiden Bomben mit ähnlicher Geometrie sowie die Ergebnisse der beiden Minen mit ähnlicher Geometrie miteinander übereinstimmen. Somit kann eine Einteilung in Objektklassen vorgenommen werden. Bereits in diesen Abbildungen ist zu sehen, dass alle Ergebnisse jeweils auf einer Geraden in der doppelt logarithmischen Darstellung liegen, was auf einen Zusammenhang in Form einer Potenzfunktion schließen lässt.

Aus den Auftriebs- und Widerstandskräften lässt sich das Moment gemäß Gl. 7 bzw. Gl. 8 berechnen. Das Verhältnis aus strömungsinduziertem Moment zum Objektmoment gibt Aufschluss über den zu erwartenden Bewegungsbeginn eines Objektes. Sobald $\frac{|M_{DL}|}{|M_0|} \geq 1$ erfüllt ist kann von einer Bewegung eines Objektes ausgegangen werden. Eine Darstellung dieses Verhältnisses und des kritischen Verhältnisses findet sich in Abb. 11.

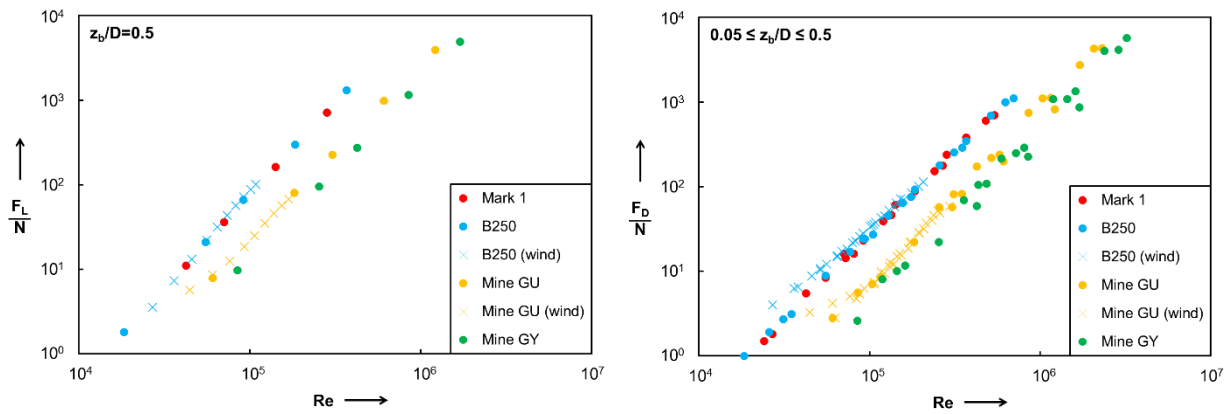


Abb. 10: Auftriebs- und Widerstandskräfte bei unterschiedlichen Versandungstiefen.

Interpoliert man nun die Messwerte, so lässt sich für jedes Objekt eine kritische Reynoldszahl bestimmen, die wiederum von der Versandungstiefe und der Anströmgeschwindigkeit abhängt. Aus

$$Re = \frac{U_0(D - z_b)}{\nu} \quad [9]$$

lässt sich somit für jede beliebige Versandungstiefe im Bereich von $0 < z_b/D \leq 0,5$ eine kritische Anströmgeschwindigkeit berechnen.

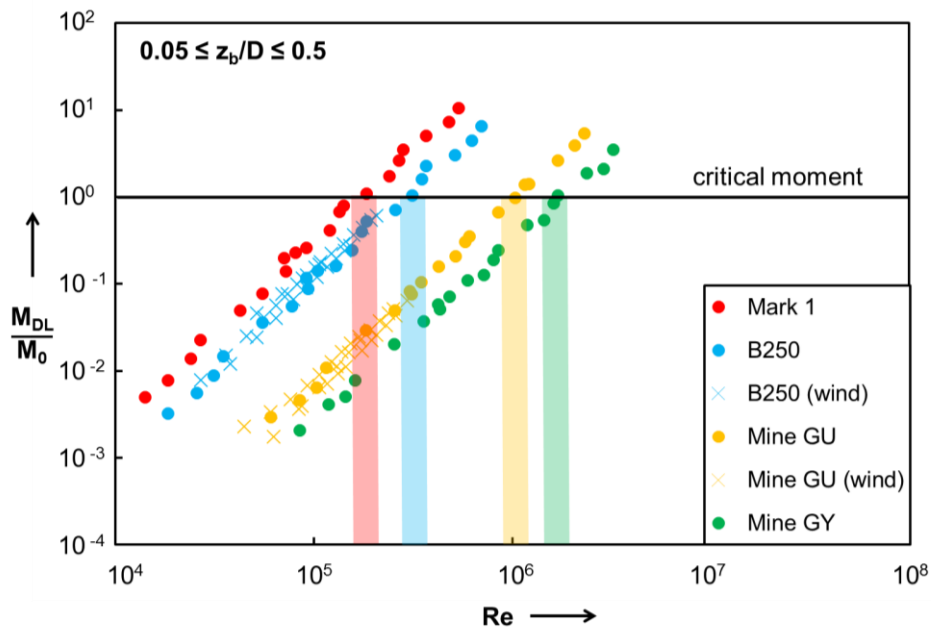


Abb. 10: Momentenverhältnis über die Reynoldszahl für alle untersuchten Objekte.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe von Windkanalmessungen und numerischen Simulationen konnte ein Modell zum Bewegungsbeginn von Munitionsaltlasten am Meeresboden angewendet werden. Die Anwendbarkeit des Modells für die unterschiedlichen Objekte wurde im Wasserkanal überprüft. Das Verhältnis von strömungsinduziertem Moment zum Objektmoment folgt einer Potenzfunktion, die in künftigen Arbeiten und durch weitere Versuche genauer quantifiziert werden soll. Weiterhin soll ein allgemeingültiger funktionaler Zusammenhang gefunden werden, der alle Objektgeometrien umfasst. Die experimentelle Validierung des Migrationsmodells soll in weiterführenden Versuchen im Wasserkanal der Universität

Rostock sowie in größerem Maßstab bei HR Wallingford erfolgen. Die gewonnenen Ergebnisse fließen anschließend in ein komplexes Geomorphologie- und Bodenmodell mit Strömungsparametrisierung ein, um Aussagen über die Möglichkeit der Migration von Munition am Meeresboden in unterschiedlichen Seegebieten zu gewinnen.

Literatur

Cantaño-Lopera, Y.A., Demir, S.T. & García, M.H., (2007). Self-Burial of Short Cylinders Under Oscillatory Flows an Combined Waves Plus Currents. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, January.

Guyonic, S. et al., (2007). Full-Scale Mine Burial Experiments in Wave and Current Environments and Comparison with Models. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, January. pp.119-32.

Jenkins, S.A. et al., (2007). Scour an Burial Mechanics of Objects in the Nearshore. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, January. pp.78-90.

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., (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. et al., (2014). Erprobung eines neuartigen Lichtfeldkamera-Messsystems zur gleichzeitigen Messung von 3D-3C-Geschwindigkeitsfeldern sowie einer 3D-Oberflächenkontur. In Ruck, B. et al., eds. *Proceedings der 22. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik", 9. - 11. September 2014*. Karlsruhe-Durlach, 2014. ISBN 978-3-9816764-0-2, ISSN 2194-2447.

Shields, A., (1936). Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilung der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*.

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