

Welleninduzierte Lasten auf Objekte am Meeresboden

P. Menzel

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

Zusammenfassung

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 Berechnungen durchgeführt, welche einen möglichen Bewegungsbeginn von Munitionsaltlasten infolge der Einwirkung von Oberflächenwellen vorhersagen. Hierbei werden unterschiedliche Wassertiefen sowie Versandungszustände berücksichtigt. Der Beitrag beschreibt die hierzu angewendeten Methoden und Gleichungen und vergleicht die strömungsinduzierte Mobilisierung aus vorherigen Arbeiten mit der welleninduzierten Mobilisierung.

Motivation

Während der Weltkriege und in der anschließenden Zeit der Entmilitarisierung wurden große Mengen funktionstüchtiger Munition in den Ozeanen, insbesondere in der Nordsee, versenkt. Nach Böttcher et al. (2012-2017) ist davon auszugehen, dass sich heute noch etwa 1,6 Millionen Tonnen Munitionsaltlasten in den deutschen Gewässern befinden. Seitdem wurden diese Munitionsaltlasten einer Reihe physikalischer, chemischer und biologischer Prozesse ausgesetzt. So kann davon ausgegangen werden, dass ein Großteil der Objekte stark korrodiert bzw. bewachsen ist. In Seegebieten mit ausgeprägter Sedimentbewegung ist davon auszugehen, dass die meisten Objekte inzwischen komplett versandet sind. Trotzdem können einzelne Objekte immer wieder freigelegt und somit gegenüber Meeresströmungen exponiert sein. Durch Wellen und Strömungen, z.B. Gezeitenströmungen, kann dann wiederum das umliegende Sediment mobilisiert werden und dadurch eine Kolkbildung im Umfeld der Objekte auftreten. Diese Kolkbildung kann nach Whitehouse (1998), Wilkens & Richardson (2007) und Jenkins et al. (2007) zu einer erneuten teilweisen Selbstversandung der Objekte führen, indem diese in das entstandene Kolkloch hineinrollen. Nach Whitehouse (1998) und Menzel et al. (2013) beträgt die so entstehende maximale Versandungstiefe z_b etwa $z_b/D = 0,8$ mit dem Objektdurchmesser D . Somit bleiben diese Objekte auch weiterhin,

wenn auch nur zum Teil, der Strömung ausgesetzt, solange sie nicht durch einen übergeordneten Effekt der Sedimentverlagerung, z.B. Dünen und Megarippel, komplett versanden. Im Folgenden werden die übergeordneten Effekte vernachlässigt und ein ebenes und homogenes Feinsandbett angenommen.

Um ein sicheres Umfeld im Rahmen von Offshore Bauaktivitäten zu gewährleisten, ist es notwendig die von Munitionsaltlasten ausgehenden Gefahren zu beseitigen. Deshalb werden im Vorfeld von Offshore Bauarbeiten umfangreiche Untersuchungen des Baugrunds durchgeführt. Hierbei wird versucht, gefährliche Objekte zu detektieren, zu identifizieren und ggf. zu beseitigen. Aufgrund der saisonalen Wetterbedingungen werden die Munitionsbeseitigungskampagnen im Bereich der Nordsee in der Regel im Frühjahr begonnen, um sie bis zum Herbst abgeschlossen zu haben. Somit können die Bauaktivitäten im darauffolgenden Frühjahr beginnen. Eine Freigabe des Baufeldes wird jedoch in der Regel nur für eine begrenzte Zeit erteilt, weil davon ausgegangen wird, dass Objekte aus anderen Seegebieten in den freigegebenen Bereich verlagert werden können. Dies hat zur Folge, dass je nach Fortschritt der Bauarbeiten, diese unterbrochen bzw. im Vorfeld von Reparaturarbeiten eine erneute Munitionskampagne durchgeführt werden muss. Dies führt zu erheblichen Mehrkosten sowie zu einer zeitlichen Verzögerung beim Ausbau der Energiegewinnung aus erneuerbaren Quellen und dem hierzu notwendigen Netzausbau sowie zu unnötig langen Ausfallzeiten im Schadensfall. Diese Praxis zeigt, dass ein großer Mangel an Verständnis für die in diesem Bereich vorherrschenden physikalischen Prozesse besteht. Aus diesem Grund sollen die sehr komplexen Prozesse einzeln untersucht und somit ein Verfahren entwickelt werden, welches eine Freigabe auf Basis der vorherrschenden Umweltbedingungen ermöglicht. Gegenstand der vorgestellten Untersuchungen ist die Mobilisierung von Munitionsaltlasten am Meeresboden infolge von Strömungen und Oberflächenwellen.

Ein Ansatz zur Bestimmung der Mobilisierung von Artilleriemunition am Meeresboden wurde im Rahmen des Environmental Research and Development Programm (SERDP) der US Navy entwickelt und in Rennie et al. (2017) vorgestellt. Das Modell basiert auf dem Ansatz nach Shields (1936) und berücksichtigt zusätzlich hydrodynamische Lasten auf die Objekte. Insbesondere wurden umfangreiche Seeveruche zur Mobilisierung kleinerer Objekte durchgeführt. Die Anwendbarkeit dieses Ansatzes für große Objekte wie Bomben und Seeminen scheint jedoch fragwürdig.

Ein auf der Reynoldszahl und einem dimensionslosen Momentenfaktor basierender Ansatz für die strömungsinduzierte Mobilisierung von Objekten am Meeresboden wurde in Menzel et al. (2018) gezeigt. Dieses allgemeingültige Vorhersagemodell kann sowohl auf kleinere Munitionstypen als auch auf große Objekte unterschiedlicher Geometrien angewandt werden. Danach kann die kritische, zur Mobilisierung notwendige Strömungsgeschwindigkeit U_{crit} als

$$U_{crit} = \sqrt[3]{\frac{\rho_w g D_{avg} V_{obj} (\rho_{obj} - \rho_w)}{2a\mu^2 L}} \cdot \frac{\mu}{\rho_w (1 - z_b^*) D_{avg}} \quad (1)$$

berechnet werden. Hierbei sind ρ_w die Dichte des Wassers, ρ_{obj} die Dichte des Objektes, g die Gravitationsbeschleunigung, μ die dynamische Viskosität des Wassers, D_{avg} der mittlere Durchmesser des Objektes, L die Länge des Objektes und V_{obj} dessen Volumen. Die relative Versandungstiefe z_b^* beschreibt den versandeten Anteil des Objektdurchmessers. Die statistisch erhobenen Parameter $a = 0,2315$ und $b = 2,1137$ wurden anhand einer Vielzahl von Versuchen und Simulationen bestimmt und ebenfalls in Menzel et al. (2018) veröffentlicht. Im Folgenden wird ein Ansatz zur Vorhersage der welleninduzierten Mobilisierung von Objekten vorgestellt, wobei sich hier auf vier in der Nordsee häufig zu findende Objekte beschränkt wird.

Methoden

Als Untersuchungsobjekte dienen die britische 250 lb Universalbombe, die britische Wasserbombe Mark 1, und die deutschen Ankertauminen Typ GY und GU, wie sie in Abb. 1 im Detail und vereinfacht dargestellt sind. In den Untersuchungen wurden die vereinfachten Modelle verwendet. Bei den im Originalzustand schwimmenden Ankertaumine wird davon ausgegangen, dass diese aufgrund von Korrosion und Undichtigkeit inzwischen komplett geflutet sind und keinerlei Lufteinschlüsse mehr enthalten. Hieraus ergeben sich Massen von $m = 112 \text{ kg}$ für die Universalbombe, $m = 45 \text{ kg}$ für die Wasserbombe, $m = 1386 \text{ kg}$ für die Ankertaumine GY und $m = 796 \text{ kg}$ für die Ankertaumine GU.

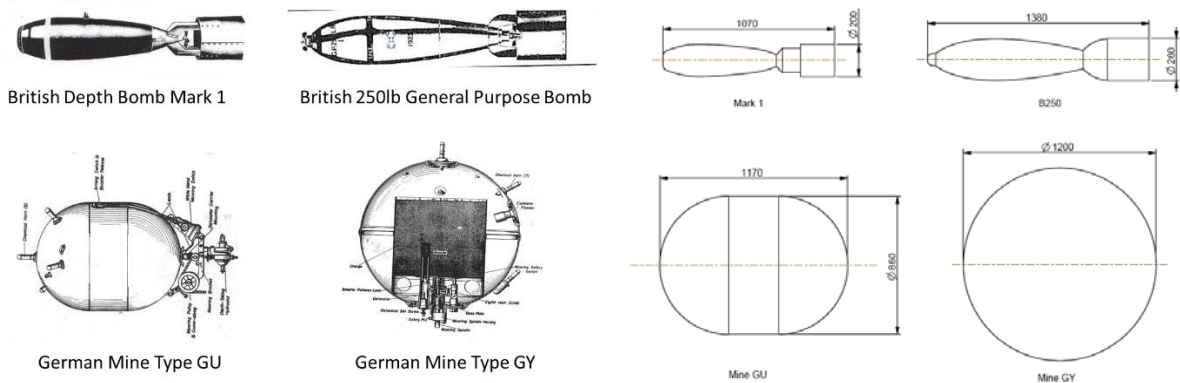


Abb 1.: Zeichnungen der axialsymmetrischen Objekte sowie deren vereinfachte Modelle.

Die in Menzel et al. (2018) beschriebene strömungsinduzierte Mobilisierung von Objekten am Meeresboden findet man hauptsächlich in stark von Gezeitenströmungen geprägten Revieren. Im Seebereich übersteigen die durch Oberflächenwellen induzierten Kräfte in der Regel die durch gleichmäßige Anströmung induzierten um ein Vielfaches. Dies gilt im Ozean entgegen der weit verbreiteten Intuition unter Umständen auch noch bei großen Wassertiefen. Abb. 2 veranschaulicht die Bewegung der Wasserteilchen in elliptischen Orbitalbahnen sowie deren Amplituden mit der Wassertiefe. Demnach ist mit einem Einfluss von Oberflächenwellen mit der Wellenlänge λ auf den Meeresboden bei einer Wassertiefe h bis zu einem Verhältnis von $h/\lambda \approx 1/2$ zu rechnen. Bei einer Wellenlänge von $\lambda = 100 \text{ m}$, wie sie regelmäßig in Sturmereignissen auftritt ist demnach bei einer Wassertiefe von $h = 40 \text{ m}$ noch ein deutlicher Einfluss der Oberflächenwellen zu verzeichnen.

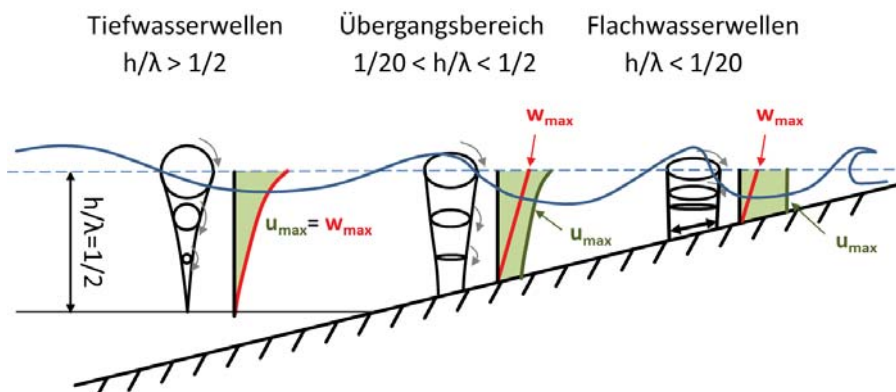


Abb. 2: Einflussbereich und Klassifizierung von Oberflächenwellen.

Geht man davon aus, dass die Kolkbildung nach Inman & Jenkins (1996) in einer durch Oberflächenwellen dominierten Umgebung annähernd symmetrisch um das Objekt herum auftritt, so lässt sich der Ansatz aus Menzel et al. (2018) nicht anwenden.

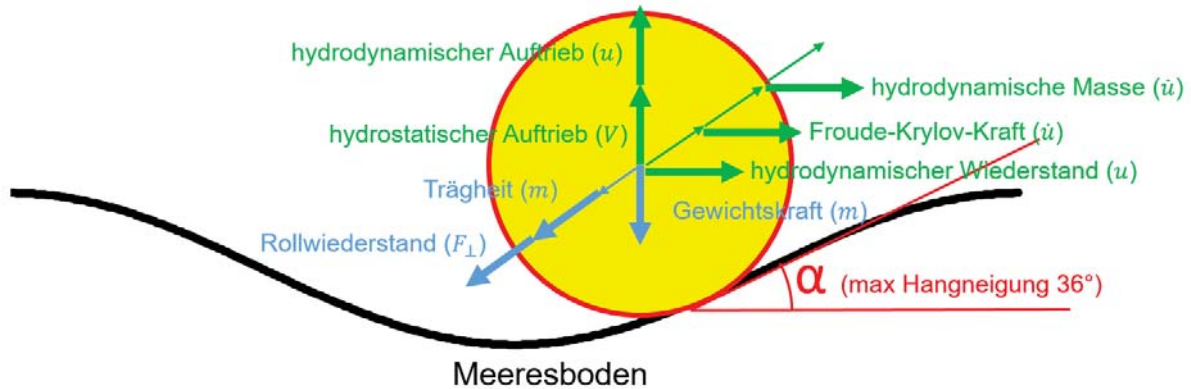


Abb. 3: Kräfte auf ein Objekt in einem symmetrischen Kolk.

In Abb 3. sind die auf ein Objekt am Meeresboden wirkenden Kräfte dargestellt. Hierbei wurde ein sinusförmiger Kolk mit einer maximalen Hangneigung von $\alpha = 36^\circ$ angenommen. Die absolute Versandungstiefe z_b beschreibt die vertikale Verlagerung des Objektes gegenüber dessen Position außerhalb des Kolks. Eine Beschreibung der dynamischen Lasten auf ein bewegliches Objekt in oszillierender Strömung wurde in Morison et al. (1950) vorgestellt. Die sich hieraus ergebende Beziehung wurde später als Morison-Gleichung bekannt und schreibt sich wie folgt:

$$m\dot{u}_{obj} = \rho V_{obj}\dot{u} + \rho c_a V_{obj}(\dot{u} - \dot{u}_{obj}) + \frac{\rho}{2}(u - u_{obj})|u - u_{obj}|c_d A_{obj}. \quad (2)$$

In der Gleichung beschreiben m die Masse des Objektes, A_{obj} die Querschnittsfläche des Objektes, u und \dot{u} die Strömungsgeschwindigkeit und die Beschleunigung des Wassers, u_{obj} und \dot{u}_{obj} die Geschwindigkeit und Beschleunigung des Objektes, ρ die Dichte des Wassers, c_a den hydrodynamischen Massenkoeffizienten und c_d den Widerstandsbeiwert. Der erste Term auf der rechten Seite der Gleichung beschreibt die Froude-Krylov-Kraft, welche durch den horizontalen Druckgradienten, hervorgerufen durch z.B. eine Oberflächenwelle, verursacht wird. Sie hängt von der Beschleunigung der Strömung und dem vom Objekt verdrängten Wasservolumen ab. Die hydrodynamische Massenkraft im zweiten Term kann als die Kraft interpretiert werden, welche zum Aufbau einer Grenzschicht in einer beschleunigten Strömung aufgewendet wird. Demnach hängt diese nur von der relativen Beschleunigung zwischen Objekt und Strömung sowie dem verdrängten Volumen ab. Der hydrodynamische Massenbeiwert ist ein formspezifischer Parameter ähnlich dem Widerstandsbeiwert im dritten Term, welcher als die hydrodynamische Widerstandskraft allgemein bekannt ist. In der Praxis wird der Teil aus dem zweiten Term, welcher die Dimension einer Masse hat nach links geschrieben und als hydrodynamische Masse eines Objektes bezeichnet:

$$(m + \rho c_a V_{obj})\dot{u}_{obj} = \rho V_{obj}\dot{u}(1 + c_a) + \frac{\rho}{2}(u - u_{obj})|u - u_{obj}|c_d A_{obj}. \quad (3)$$

Die vertikalen Kräfte auf das Objekt werden vorerst separat betrachtet. Aufgrund der Hangneigung erzeugen auch sie eine horizontale Kraftkomponente, welche auf Basis des aktuellen Hangneigungswinkels und der Beziehungen in Abb. 4 als

$$F_x = \cos \alpha F_{\parallel} = \cos \alpha \sin \alpha (F_g - F_b - F_l) \quad (4)$$

bestimmt werden können.

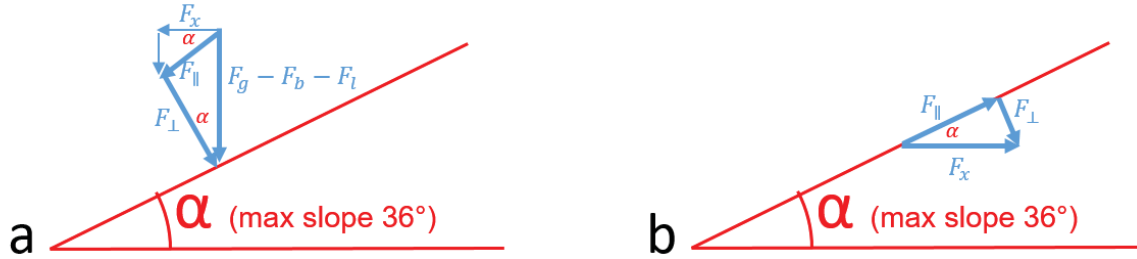


Abb. 4: Hangabtriebskraft (a) und Reibungskraft (b).

Setzt man die Gewichtskraft F_g , den hydrostatischen Auftrieb F_b und hydrodynamischen Auftrieb F_l , in Gl. (4) ein, so schreibt sich diese als

$$F_g - F_b - F_l = (m - \rho V_{obj})g - \frac{\rho}{2}(u - u_{obj})|u - u_{obj}|c_l A_{obj}. \quad (5)$$

Betrachten wir in Gl. (3) lediglich die horizontale Kraftkomponente, so kann diese um die in Gl. (5) aufgeführten Kräfte wie folgt erweitert werden:

$$\begin{aligned} (m + \rho c_a V_{obj})\dot{u}_{obj} &= \rho V_{obj}\dot{u}(1 + c_a) + \frac{\rho}{2}(u - u_{obj})|u - u_{obj}|c_d A_{obj} \\ &+ \cos \alpha \sin \alpha \left\{ (m - \rho V_{obj})g \right. \\ &\left. - \frac{\rho}{2}(u - u_{obj})|u - u_{obj}|c_l A_{obj} \right\}. \end{aligned} \quad (6)$$

Aus diesen horizontalen Kräften lassen sich entsprechend Abb. 4b die vertikalen Kräfte als

$$F_{\perp} = F_x \sin \alpha, \quad (7)$$

bestimmen. Der oberflächenparallele Rollwiderstand ergibt sich als

$$F_{r\parallel} = c_r F_x \sin \alpha \quad (8)$$

und dessen horizontale Komponente als

$$F_{rx} = c_r F_x \sin \alpha \cos \alpha. \quad (9)$$

Setzt man Gl. (9) in Gl. (6) ein und stellt diese dann nach der Objektbeschleunigung um, so erhält man die finale Gleichung für die welleninduzierte Bewegung eines Objektes am Meeresboden

$$\begin{aligned} \dot{u}_{obj} &= [1 + c_r \sin \alpha \cos \alpha] \left[\rho V_{obj}\dot{u}(1 + c_a) + \frac{\rho}{2}(u - u_{obj})|u - u_{obj}|c_d A_{obj} \right. \\ &\left. + \cos \alpha \sin \alpha \left\{ (m - \rho V_{obj})g - \frac{\rho}{2}(u - u_{obj})|u - u_{obj}|c_l A_{obj} \right\} \right] \\ &\cdot (m + \rho c_a V_{obj})^{-1}. \end{aligned} \quad (10)$$

Setzt man nun die instantanen Geschwindigkeiten und Beschleunigungen, welche durch Oberflächenwellen nahe des Meeresbodens erzeugt werden ein, so erhält man die instantane Beschleunigung des Objektes. Um diese zu erhalten können diverse Wellentheorien herangezogen werden. Hier wurde die Wellentheorie dritter Ordnung nach Stokes verwendet. Die Integration über die Zeit bzw. Position des Objektes führt zu einer Aussage darüber, ob ein Objekt das Kolkloch verlässt oder seine Position beibehält. Führt man diese Simulation

über unterschiedliche Versandungstiefen, Wassertiefen, Wellenlängen und Wellenhöhen durch, so können die kritischen Werte bestimmt werden.

Ergebnisse

Die kritischen Wellenbedingungen aus der auf Gl. (10) beruhenden Simulation sind für die oben genannten Objekte in Abb. 5 aufgetragen. Die Abbildung zeigt die kritischen Wellenhöhen und –längen für eine Wassertiefe von $h = 45 \text{ m}$ bei einer Versandungstiefe von $z_b/D = 0,5$. Die linke Grenze in den Kurven ist durch die kritische Wellensteilheit gegeben, wonach Wellen jenseits dieses Bereichs nicht existieren, sondern sofort brechen würden.

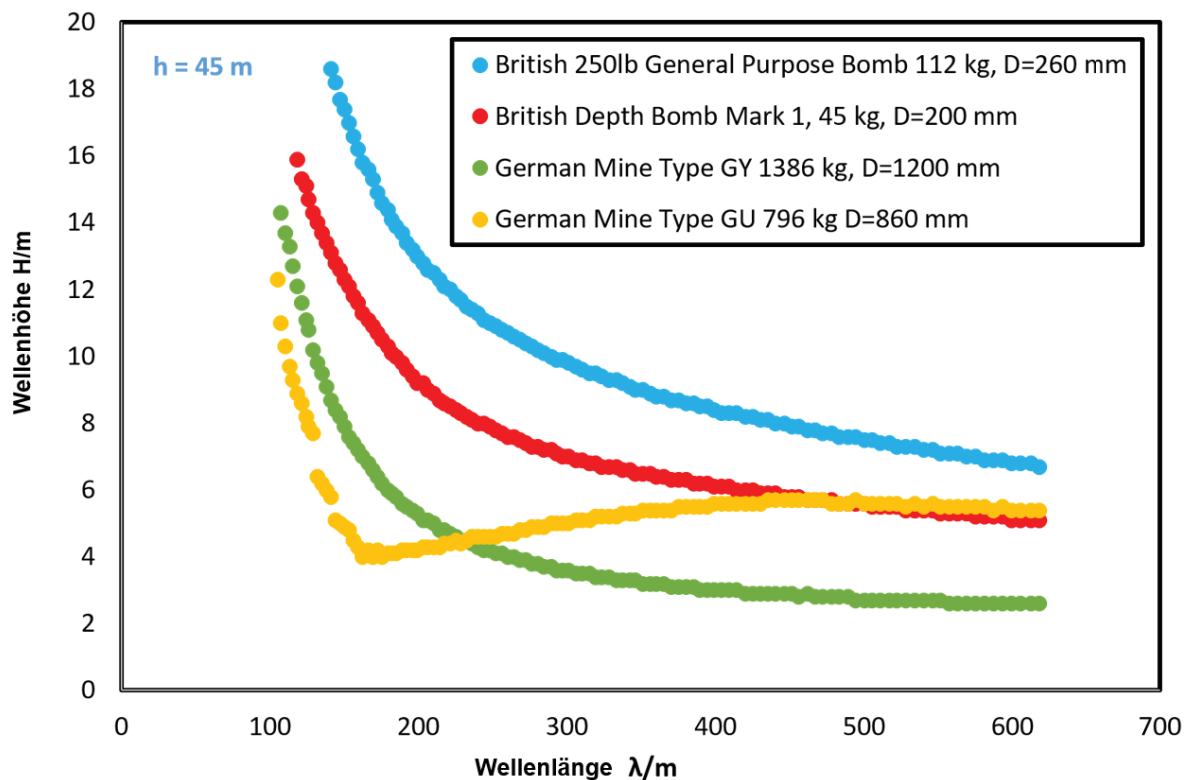


Abb. 5: Kritische Bedingungen für die britische Universalbombe.

Zum Vergleich sind diese Ergebnisse denen für die strömungsinduzierte Mobilisierung der gleichen Objekte aus Menzel et al. (2017) in Abb. 6 gegenübergestellt. Hieraus wird deutlich, dass die Objekte mit einem kleinen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen (im Extremfall eine Kugel) deutlich sensitiver auf oszillierende Strömungen reagieren als Objekte mit einem großen Verhältnis von Oberfläche zu Volumen. Unter gleichmäßiger Anströmung jedoch kehrt sich dieses Verhalten um. Zu erklären ist dies bereits anhand der Morison Gleichung (Gl. (2)). Hiernach berechnen sich die Kräfte aus oszillierenden Strömungen mit starken Beschleunigungen des Fluids ausschließlich auf Basis des Volumens des Objektes, während die aus der gleichmäßigen Anströmung resultierenden Widerstandskräfte auf Basis der Querschnittsfläche des Objektes bestimmt werden.

Möchte man meeres-technische Bauwerke, Anker oder Messsonden so gestalten, dass sie möglichst geringen Kräften ausgesetzt sind, so ist zwischen Einsatzorten mit dominierender Wellenaktivität und Gebieten mit dominierenden Gezeitenströmungen zu unterscheiden. In gezeitendominierten Gebieten, wie z.B. dem deutschen Wattenmeer, sind hierfür demnach voluminösere Objekte zu empfehlen, während auf der offenen See mit dominantem Einfluss von Oberflächenwellen zylindrische und flache Objekte zu bevorzugen sind.

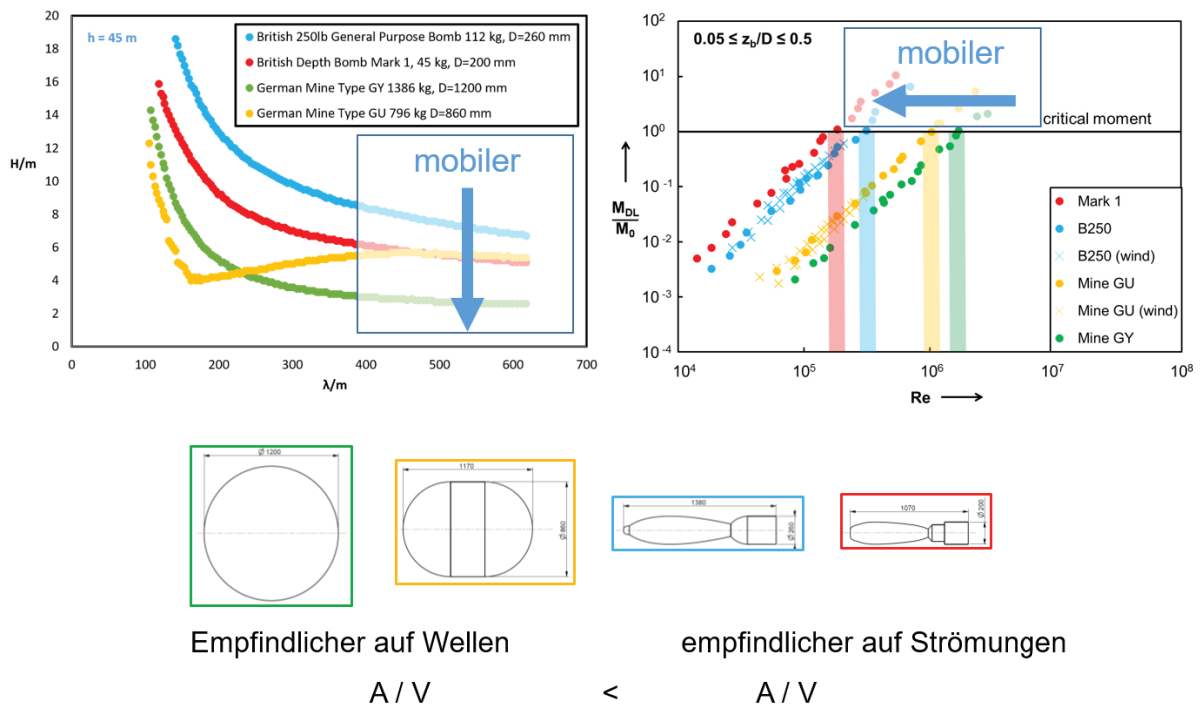


Abb. 6: Gegenüberstellung der Ergebnisse für die welleninduzierte (links) und die strömungsinduzierte (rechts) Mobilisierung von Objekten am Meeresboden.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der Morison Gleichung konnte die welleninduzierte Mobilisierung von Munitionsaltlasten am Meeresboden vorhergesagt werden. Anhand dieser Erkenntnis ist es nun möglich eine auf Basis von Umweltdaten befristete Freigabe von Seegebieten für Bauaktivitäten zu erstellen. Weiterhin wird es künftig möglich sein, anhand von aufgezeichneten Wellendaten zu bestimmen, wie oft es in der Vergangenheit in verschiedenen Seegebieten zu einer möglichen Mobilisierung von Munitionsaltlasten gekommen ist um dies als Planungsgrundlage für zukünftige Aktivitäten zu nutzen. Mit Hilfe eines permanenten Monitorings ist es möglich, für jeden Ort in einem bestimmten Seegebiet eine Aussage über eine mögliche Mobilisierung der dort befindlichen Objekte seit der letzten Untersuchung zu bestimmen.

Literatur

- Böttcher, C.; Knobloch, T.; Sternheim, J.; Weinberg, I.; Wichert, U.; Wöhler, J.; Munitionsbelastung der deutschen Meeresgewässer – Entwicklungen und Fortschritt (Jahre 2012-2017); Bund/Länder-Ausschuss Nord- und Ostsee (BLANO)
- Inman, D.L.; Jenkins, S.A.; A Chronology of a Ground Mine Studies and Scour Modeling in the Vicinity of La jolla; ser. SIO Ref. Ser. No. 96-13; San Diego, CA: Scripps Institute of Oceanography; 1996
- 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 Journal of Oceanic Engineering, January. pp.78-90.
- Menzel, P.; Rückborn, T.; Leder, A.; Flow and scour around cylindrical objects in laboratory experiments; OCEANS - Bergen, 2013 MTS/IEEE , vol., no., pp.1,8, 10-14 June 2013, doi: 10.1109/OCEANS-Bergen.2013.6607970

- Menzel, P.; Schütt, C.; Wranik, H.; Paschen, M.; Drews, A.; Towards a general prediction-model for the current-induced mobilisation of objects on the sea floor; *Ocean Engineering*, Volume 164, 2018, Pages 160-167, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.06.047>.
- Menzel, P.; Wranik, H.; Paschen, M.; Migration von Munitionsaltlasten am Meeresboden Proceedings der 25. GALA-Fachtagung "Experimentelle Strömungsmechanik", 5. - 7. September 2017, Karlsruhe, Hrsg.: Ruck, B.; Gromke, C.; Leder, A.; Dopheide, D., ISBN 978-3-9816764-3-3, ISSN 2194-2447
- Morison, J.R., O'Brien, M.P., Johnson, S.A. & Schaaf, S.A., (1950). The force exerted by surface waves on piles. *Petroleum Transactions AIME* Vol.189, pp.149-54.
- Rennie, S.E., Brandt, A. & Friedrichs, C.T., (2017). Initiation of motion and scour burial of objects underwater. *Ocean Engineering* 131 (2017) 282-294, February.
- Shields, A., (1936). Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. Mitteilung der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau.
- Whitehouse, R., (1998). *Scour at marine structures - A manual for practical applications*. London: Thomas Telford.
- Wilkens, R.H. & Richardson, M.D., (2007). Mine Burial Prediction: A Short History and Introduction. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, January. pp.3-9.