

Kolkbildung und Kolkschutz an Offshore Jacket-Strukturen

P. Menzel, M. Paschen

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

Motivation

Im Rahmen der Abwendung von fossilen Brennstoffen zur Energiegewinnung hin zu erneuerbaren Energien gewinnt die Windenergie stetig an Bedeutung. Insbesondere im Offshore-Bereich sind die Verhältnisse aus energetischer Sicht mit stetigerem und kräftigerem Wind deutlich besser als an Land. Auf See trifft man jedoch auf neue Herausforderungen, die bisher an Land nicht zu berücksichtigen waren. Gerade bei der Gründung von Offshore-Bauwerken gibt es bisher wenig Erfahrung und es treten zusätzliche Probleme auf. Die Erosion von Sediment im Umfeld von Offshore-Fundamenten kann die Eigenfrequenzen der so gegründeten Strukturen signifikant verändern und deren Standsicherheit stark gefährden. Insbesondere die Kabelanschlüsse können durch Sedimenterosion betroffen sein, woraufhin die Kabel frei hängend verstärkt den seegangsinduzierten hydrodynamischen Belastungen ausgesetzt sind. Untersuchungen zu den Ursachen von Erosion sind somit unerlässlich und stellen die Grundlage für zukünftige Verbesserungen zum Kolkschutz dar.

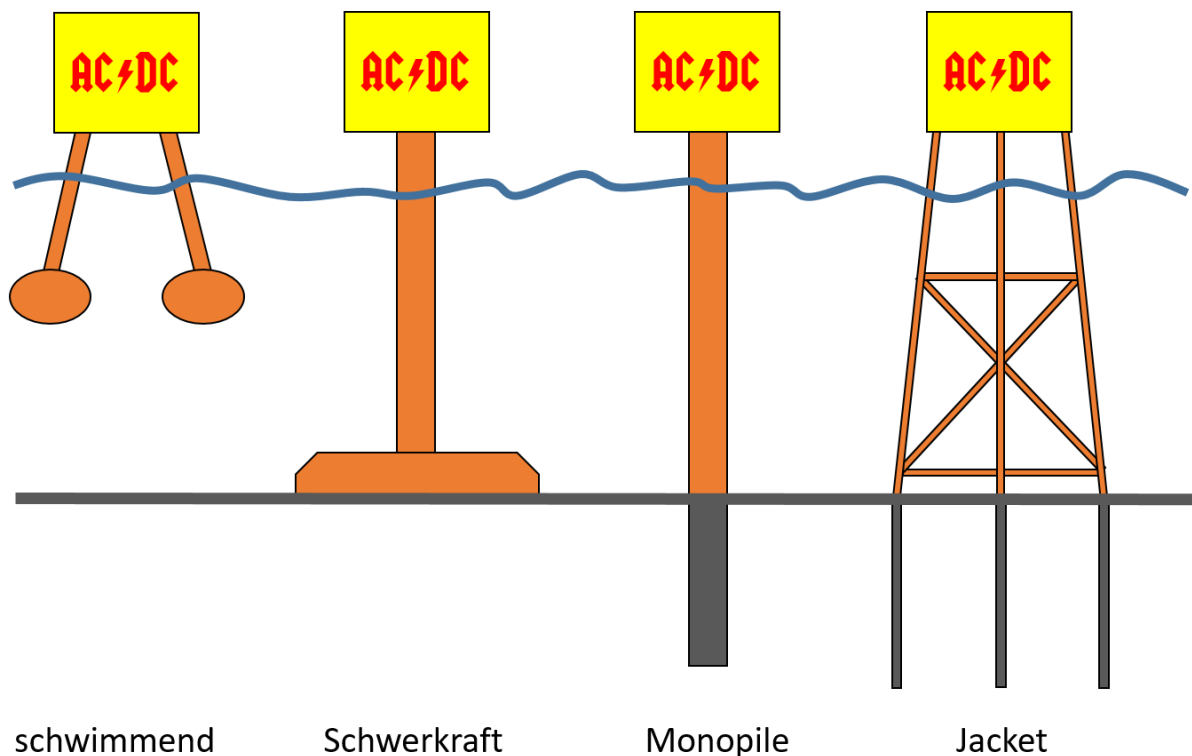


Abb.1: Gründungsstrukturen für Offshore-Umspannplattformen

Die Gründung von Offshore Umspannplattformen kann durch unterschiedliche Prinzipien erfolgen. Die wichtigsten sind in Abb. 1 festgehalten. Hierbei wird zwischen schwimmenden

und fest gegründeten Strukturen unterschieden. Bei den festen Gründungen unterscheidet man zwischen Monopile-Fundamenten, bei denen nur ein zentrales Zylinderfundament in den Meeresboden getrieben wird und Jacket-Strukturen, welche die Lasten analog zu den auch an Land verwendeten kleineren Gittermasten über eine Vielzahl von Einzelelementen in den Meeresboden einleiten. Diese Jacket-Strukturen werden meist über mehrere „Nägel“ im Meeresboden verankert. Im Unterschied zu diesen beiden Strukturen werden auch Schwerkraftfundamente verwendet, welche aufgrund ihrer großen Auflagefläche am Meeresboden die Druckdifferenz zwischen Ober- und Unterseite der Struktur nutzen, um ähnlich eines Saugankers eine feste Verankerung zu gewährleisten. Aufgrund der Größe der heute in der Nordsee verbauten Umspannplattformen kommen Monopile-Gründungen nur noch für die kleinsten Stationen innerhalb eines Windparks in Frage. Auch schwimmende Plattformen werden bei den in der Nordsee vorliegenden, geringen Wassertiefen nicht verwendet. Die aktuell im Bereich der Deutschen Bucht verbauten großen Hochspannungsgleichstrom Übertragungsplattformen (HGÜ-Plattformen) sind ausschließlich als Schwerkraft- und Jacketstrukturen gegründet, wobei die Schwerkraftgründung auch hier aufgrund ihrer Größe eher die Ausnahme ist.

Durch die am Lehrstuhl für Meerestechnik (Imt) durchgeführten Untersuchungen sollen Maßnahmen zur Reduzierung und Verhinderung der Kolkbildung erarbeitet und erprobt werden. Hierzu sind die strömungsmechanischen Ursachen für die Erosion von Sediment am Meeresboden zu erörtern, um durch gezielte Strömungsbeeinflussung eine Reduktion der Kolkiefen zu erreichen.

Stand der Forschung

Die Kolkbildung im Gründungsbereich von Jacket-Strukturen wurde in der Vergangenheit bereits ausführlich untersucht. Das Buch von Whitehouse (1998) bildet hier das Standardwerk.

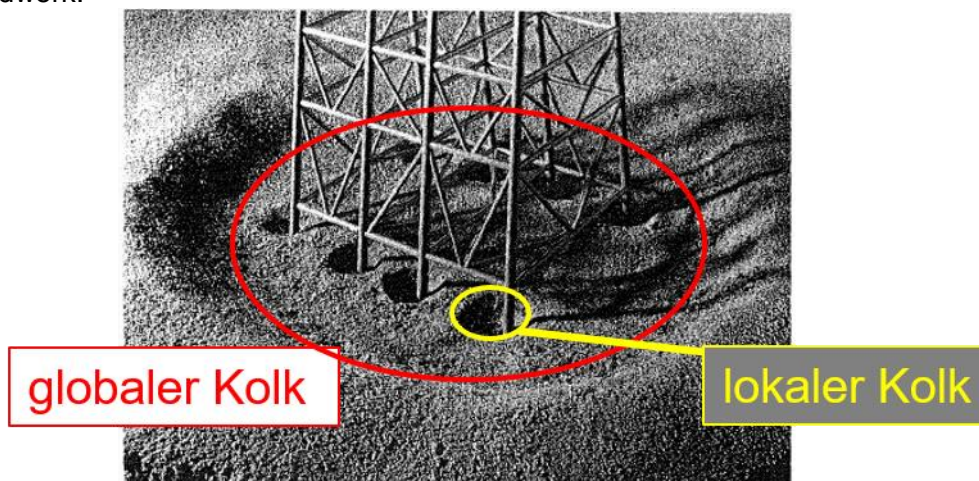


Abb.2: Charakteristische Kolkstrukturen an einer Jacket-Struktur aus Whitehouse (1998)

Hiernach unterscheidet man zwischen einem globalen Kolk, der durch die Gesamtstruktur und deren Versperrung verursacht wird und lokalen Kolken, welche durch vertikalen Pfeiler hervorgerufen werden. Hieraus ergibt sich bereits die Analogie zur Kolkbildung an einem einzelnen Zylinder bzw. Monopile. Die Umströmung eines Monopiles sowie hierdurch verursachte die Kolkbildung wurden bereits in Menzel et al. (2016) beschrieben.

Ein Effekt, der in Whitehouse (1998) nur indirekt Berücksichtigung findet, ist die Kolkbildung unterhalb der horizontalen Strukturelemente. Für Pipelines am Meeresboden wurden hierzu jedoch umfangreiche Untersuchungen z.B. von Fredsøe et al. (1988), Chiew (1990) und Sumer et al. (2001) durchgeführt, wobei diese im Ausgangszustand in der Regel auf dem Meeresboden aufliegen. In Mao (1986) wurde der Effekt der Tunnelerosion unterhalb eines am Meeresboden aufliegenden Zylinders beschrieben. Bei der Errichtung von Jacket-Fundamenten fanden diese Erkenntnisse bisher keine Anwendung, da strukturmechanische Fragen meist im Vordergrund standen.

Versuche an einzelnen Strukturelementen

Zur Untersuchung der Kolkbildung an einem Jacket wurden Vorversuche an einzelnen Strukturelementen des Jackets durchgeführt. Diese fanden am Wasserkanal des Lehrstuhls für Strömungsmechanik der Universität Rostock (siehe Abb. 3a) statt. Das Modell eines vertikalen Monopiles wurde wie in Abb. 3c mittig in der Messstrecke installiert. Zur Untersuchung der Tunnelerosion unterhalb eines horizontalen Strukturelementes eines Jackets wurde ein horizontal angeordneter Zylinder installiert. Die genaue Anordnung ist ebenfalls Abb. 3e zu entnehmen. Um die Abhängigkeit der Kolktiefe z_b vom Verhältnis aus Zylinderdurchmesser D zum Bodenabstand z_e zu bestimmen, wurde der horizontale Zylinder mit einem variablen Bodenabstand installiert. Abb. 3f zeigt die eine Prinzipskizze der Anordnung mit den wichtigsten Größen.

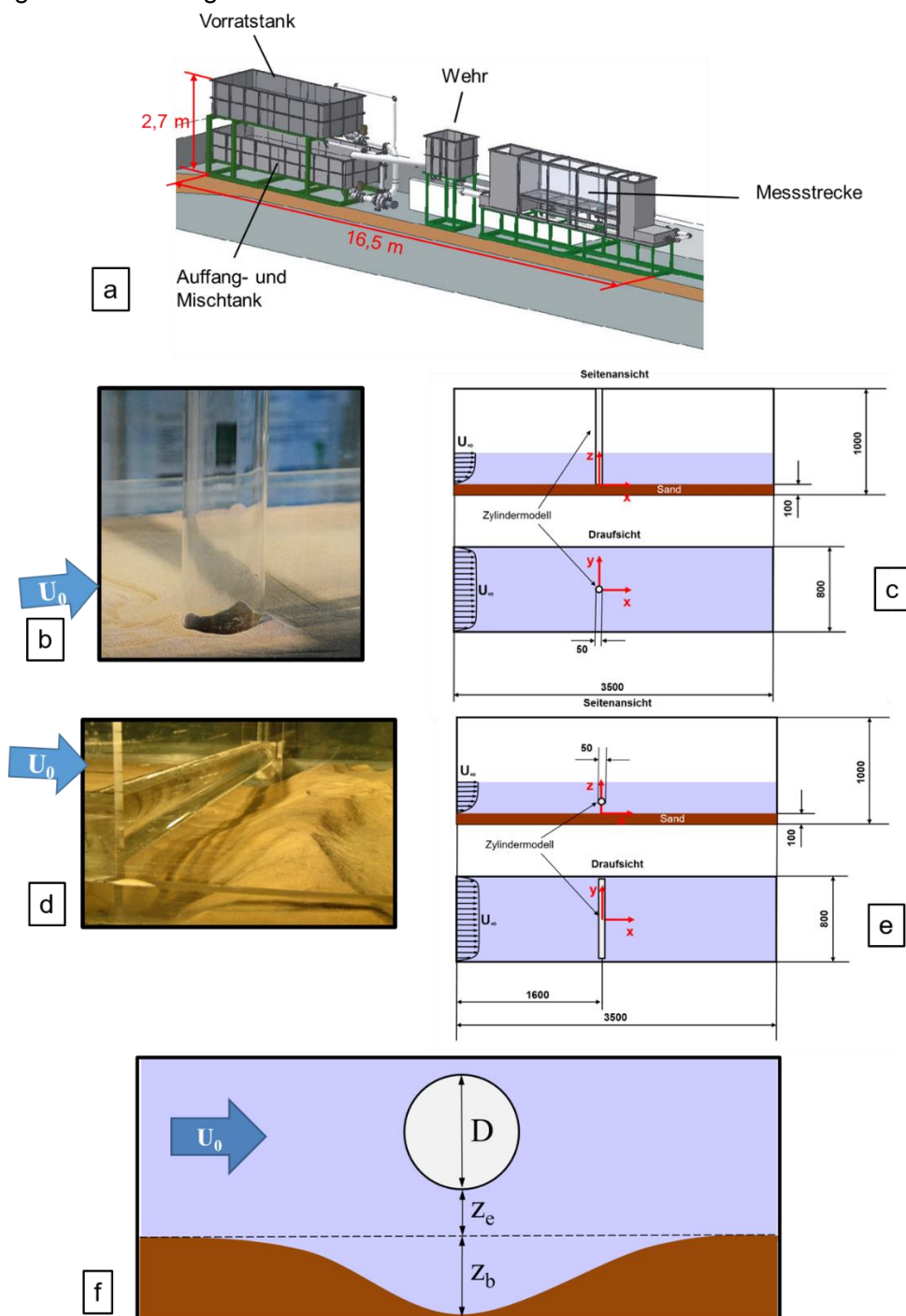


Abb.3: Versuchskanal in Rostock sowie die unterschiedlichen Versuchsaufbauten

Die Ergebnisse der Untersuchungen an einem vertikalen Monopile wurden bereits in Menzel et al. (2016) ausführlich erläutert. Demnach ist der Hufeisenwirbel für die Erosion von Sediment verantwortlich. Es wurde weiterhin gezeigt, dass es unter gleichmäßiger Anströmung eine maximale Kolkentiefe z_b gibt, die bezogen auf den Zylinderdurchmesser D mit $z_b/D \approx 0,8$ im Laborexperiment bestimmt wurde. Um die Kolkbildung an einem Monopile zu reduzieren wurden drei Kolkenschutzsysteme untersucht. In Abb. 4 zeigt neben der Ausgangssituation in Abb. 4a die drei untersuchten Kolkenschutzsysteme sowie der Wirkungsweisen. Die Kegelstruktur in Abb. 4b soll dafür sorgen, dass der Hufeisenwirbel leicht reduziert wird und vor allem nicht mehr mit dem Sediment wechselwirken kann. Im Unterschied dazu soll beim Reifenstapel in Abb. 4d vor allem die Wechselwirkung mit dem Sediment verhindert werden, wobei eine Beeinflussung des Hufeisenwirbels hier nicht im Vordergrund der Überlegungen stand. In Anlehnung an die Natur wurde das künstliche Seegras in Abb. 4c entwickelt. Hierbei werden auftriebsbehaftete Kunststoffasern derart angeordnet, dass dies etwa 1,5 m langen Strukturen eine Reduzierung der wandnahen Strömungsgeschwindigkeit verursachen und aufgrund dessen sowie ihrer Flexibilität eine Ausbildung des Hufeisenwirbels verhindern.

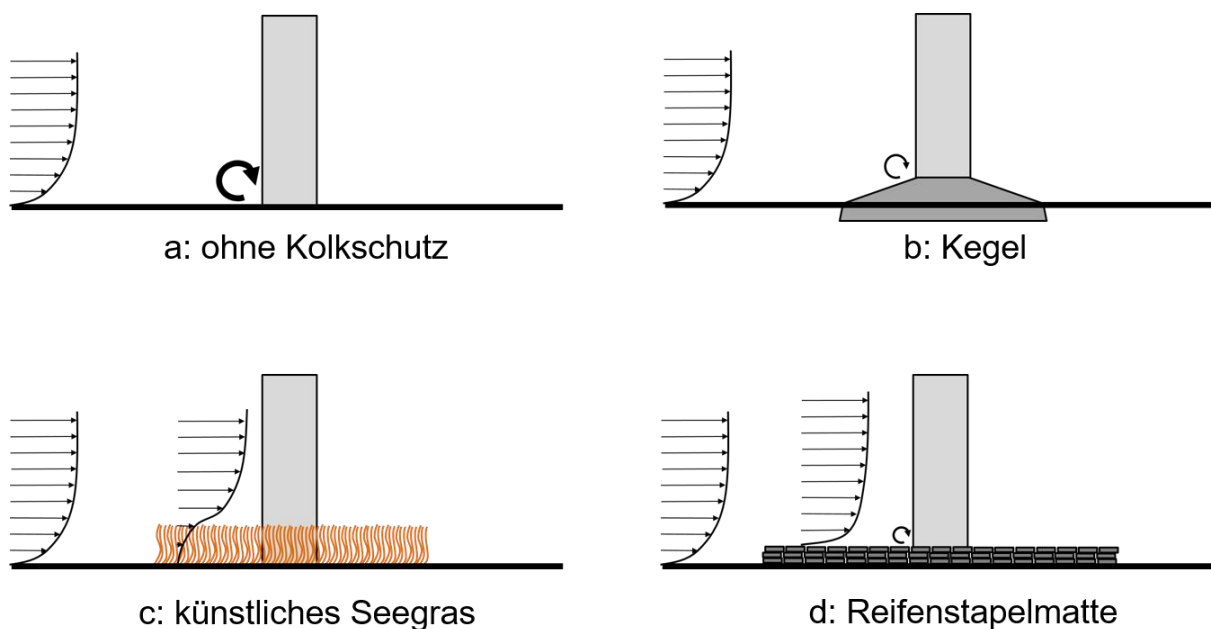


Abb.4: Prinzipischnen der untersuchten Kolkenschutzsysteme

Abb. 5 zeigt exemplarisch, wie sich das Erosionsverhalten durch die Modelle bei gleichmäßiger Anströmung verändert. Wie man deutlich erkennt, können die beiden Systeme b: Kegel und d: Reifenstapel in bestimmten Bereichen eine Erosion verhindern. An den Rändern der Systeme kommt es jedoch weiterhin zu einer starken Kolkbildung. Im Falle des Kegels ist damit zu rechnen, dass dieser ggf. komplett unterspült werden kann, da die zu erwartende Kolkentiefe an den Rändern größer ist als am Monopile selbst. Somit könnte eine deutlich stärkere Erosion am Monopile auftreten, als dies ohne das System der Fall wäre. Sobald ein Unterspülen des Kegels zuverlässig verhindert werden kann, bietet das System jedoch einen sehr guten Kolkchutz direkt am Monopile. Da die Reifenstapelmatte relativ flexibel ist, kann diese in die am Rand entstehenden Kolklöcher hineinsinken und somit ein Unterspülen des Systems verhindern. Nahe des Zylinders ist jedoch zu beobachten, dass der weiterhin auftretende Hufeisenwirbel in der Lage ist, Sediment im Fußbereich des Monopiles zu erodieren. Hier kommt es vor allem auf die vertikale Anordnung der Reifen an. Das beste Ergebnis lieferte das künstliche Seegras. Auch hier kommt es an den Rändern zur Erosion. Aufgrund der Flexibilität der Struktur kann diese jedoch in das entstandene Kolkloch hineinsinken und somit eine Unterspülung verhindern. Im Bereich der Seegrasmatte selbst konnte keine Erosion festgestellt werden. Tatsächlich wurde eine geringfügige Akkumulation von Sediment beobachtet, wie sie auch an Land z.B. an Dünen im Bereich des Strandhafers

auftritt. Offenbar werden Wandschubspannung und Hufeisenwirbel deutlich reduziert. Weiterhin wird die bodennahe Strömungsgeschwindigkeit derart herabgesetzt, dass suspendiertes Sediment in der Anströmung absinken und akkumulieren kann.

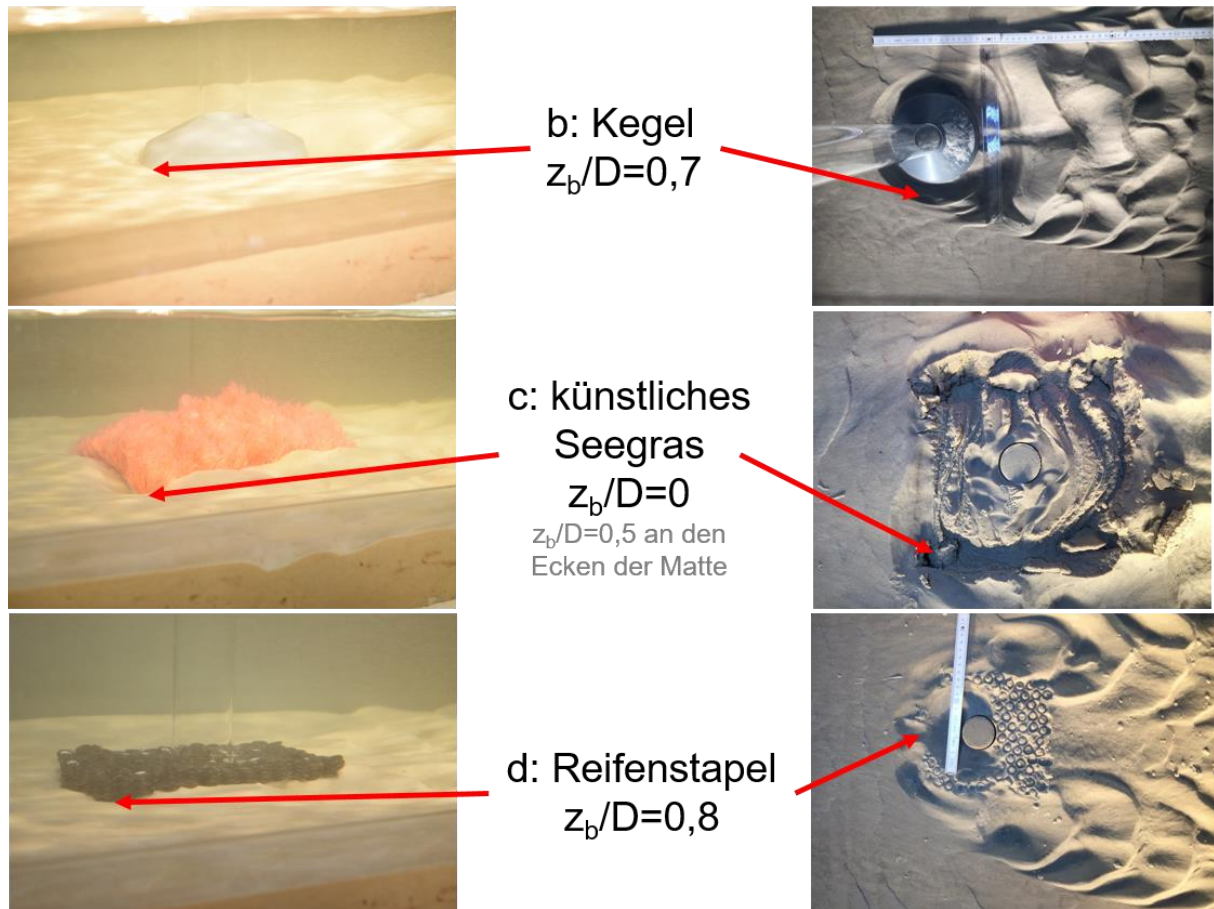


Abb.5: Wirksamkeit der untersuchten Kolkenschutzsysteme

Während die Kolkchutzmaßnahmen am Monopile als korrigierende Maßnahmen bei vorhandenem Kolk bzw. an einem Strukturelement, an dem die Kolkbildung nicht zu verhindern ist, verstanden werden können, gilt es bei der Tunnelerosion bereits in der Konstruktionsphase des Jacket die Erosion von Sediment zu verhindern. Abb. 6 zeigt exemplarisch einen Versuch mit einem ursprünglich auf dem Meeresboden aufliegenden Zylinder. Deutlich ist die Tunnelerosion in dem Foto zu erkennen. In einer Vielzahl von Versuchen wurden das Verhältnis von Zylinderdurchmesser zu Bodenabstand sowie die Anströmungsgeschwindigkeit variiert und der jeweilige zeitliche Verlauf der Erosion vermessen. Somit konnte die aus den Untersuchungen an Pipelines bekannte Vermutung bestätigt werden, dass die maximale Kolkentiefe unter einem horizontalen Zylinder von dessen Durchmesser abhängt. Durch Variation des Bodenabstands konnte weiterhin festgestellt werden, dass die maximale Kolkentiefe mit steigendem Bodenabstand bzw. abnehmendem Zylinderdurchmesser abnimmt.

Weitere Analysen aller Messdaten ergaben einen funktionalen Zusammenhang zwischen der maximalen Kolkentiefe z_b , dem Zylinderdurchmesser D und der Spalthöhe zwischen Zylinderunterseite und Boden z_e in Form der Exponentialfunktion

$$\frac{z_b}{D} = 0,5043 \cdot e^{-1,961 z_e/D}$$

Anhand dieser Berechnungsvorschrift kann davon ausgegangen werden, dass der Einfluss eines horizontalen Zylinders nahe des Meeresbodens ab einer Spalthöhe von etwa einem

Zylinderdurchmesser als vernachlässigbar klein betrachtet werden kann. Es wird demnach empfohlen, die horizontalen Verstreibungen so weit wie möglich vom Meeresboden entfernt anzuordnen, jedoch mindestens einen Abstand in Größenordnung des Strebendurchmessers selbst einzuhalten.

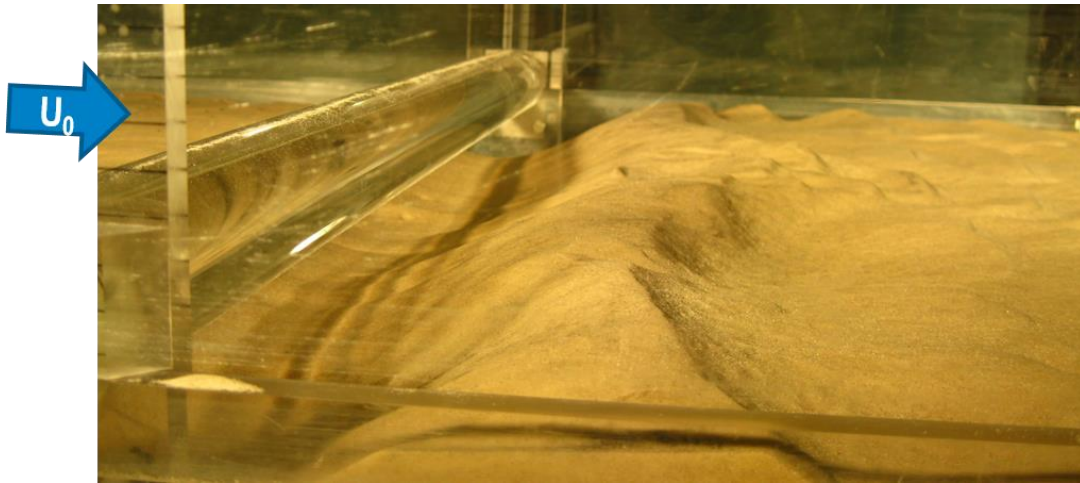


Abb.6: Kolkbildung unterhalb eines horizontal verlaufenden Zylindermodells

Versuche an einem Jacket

Nachdem die beiden wichtigsten Ursachen für die Erosion von Sediment untersucht und entsprechende Kolkschutzmaßnahmen beschrieben wurden, wurden Versuche mit Modellen realer Jackets im Fast Flow Facility bei HR Wallingford durchgeführt. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsanlage findet sich in Whitehouse et al. (2014). Entscheidend für die Auswahl der Versuchsanlage waren die hohe zu erreichende Strömungsgeschwindigkeit von bis zu $U_0 = 2 \text{ m/s}$, die Größe der Messstrecke mit einer Breite von 4 m und einer Länge von 60 m sowie die hohe Wasserqualität, welche neben akustischer Strömungsmesstechnik auch optische Messungen zulässt.

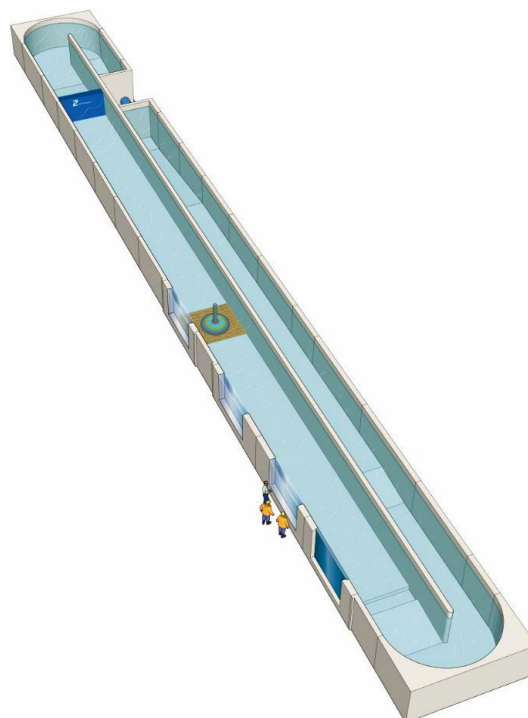


Abb.7: Fast Flow Facility (FFF) bei HR Wallingford

Ein bereits optimiertes Jacket wurde dort, wie in Abb. 8 gezeigt, derart angeordnet, dass der Spalt unterhalb der horizontalen Streben genau dem Durchmesser der Streben entsprach. Auf einen Kolkschutz im Bereich der vertikalen Streben wurde im Versuch in Abb. 8 verzichtet. Das Geschwindigkeitsprofil in der Anströmung wurde mit einem abwärts schauenden akustischen Strömungsprofilsensor (AQD current profiler / Aquadopp) vermessen. Ein Unterwasser Laserscanner (ULS) wurde verwendet, um die Bodenstrukturen während der Versuche zu vermessen.

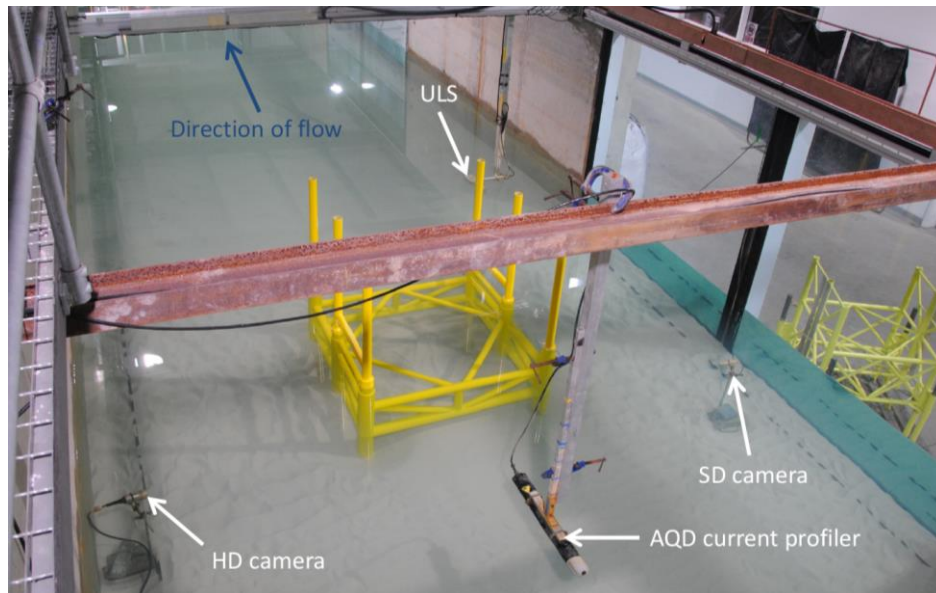


Abb.8: Versuchsaufbau im FFF

Die Versuche wurden so lange durchgeführt, bis nach jeweils etwa sieben Stunden keine signifikanten Veränderungen der Bodenstruktur mehr auftraten. Es zeigte sich deutlich, dass die Bodenstruktur unterhalb der horizontalen Verstrebung in der Mitte des Jacketts unverändert bleibt. Dies beweist, dass nur minimale Veränderungen an der Geometrie von Jackettstrukturen bereits eine deutliche Verbesserung der Konstruktion bzgl. der Kolkbildung bewirken können.



Abb.9: Kolkbildung an einem Jacket-Modell im FFF

Die maximale Kolkentiefe an den vertikalen Pfeilern kann Abb. 10 entnommen werden. Der gemessene Maximalwert von $z_b/D = 1,5$ ist vor allem auf die lange Versuchszeit zurückzuführen und stellt einen auskonvergierten Zustand dar.

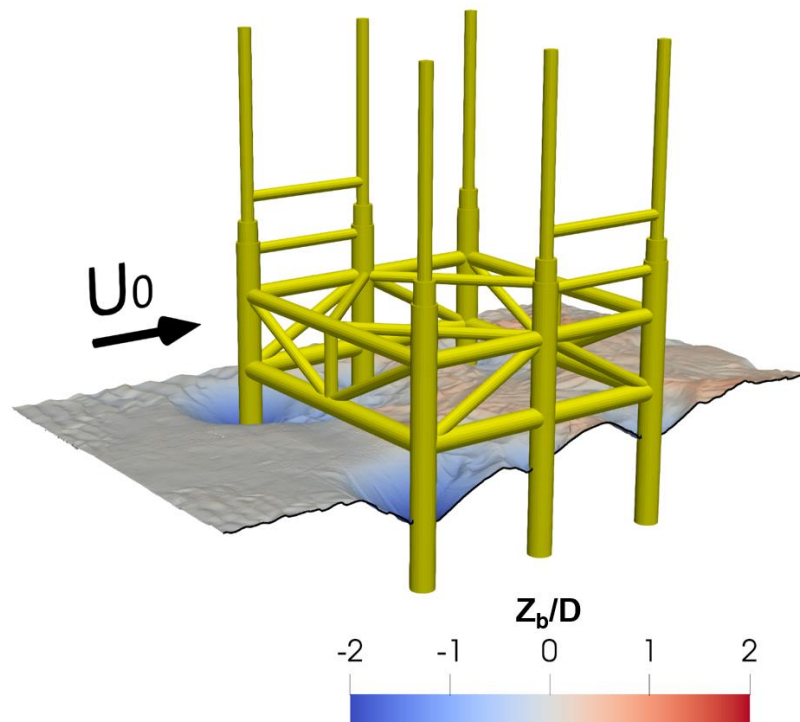


Abb.10: Bodenstrukturen am Jacket nach 416 min Versuchszeit

Zusammenfassung

Es wurde die Kolkbildung im Umfeld einer Jacket-Struktur untersucht. Hierzu wurden Vorversuche an einzelnen Strukturelementen durchgeführt. Es wurden unterschiedliche Kolkenschutzsysteme für eine vertikale Stütze untersucht, wobei das künstliche Seegras den maximalen Kolkenschutz darstellt. Für die Kolkentiefe im Bereich der Tunnelerosion unterhalb einer horizontalen Verstrebung wurde ein funktionaler Zusammenhang zwischen maximaler Kolkentiefe, Zylinderdurchmesser und Bodenabstand angegeben. Versuche am Modell einer optimierten realen Jacketstruktur zeigen, dass einfache konstruktive Maßnahmen zu einer erheblich Reduzierung der Kolkiefen führen können.

Literatur

- Chiew, Y.M., (1990). Mechanics of local scour around submarine pipe. *Journal of Hydraulic Engineering, Volume 116, Issue 4*, pp.515-29.
- Fredsøe, J., Hansen, E.A., Mao, Y. & Sumer, B.M., (1988). Three-dimensional scour below pipelines. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Volume 110, Issue 4*, pp.337-79.
- Mao, Y., (1986). *THE INTERACTION BETWEEN A PIPELINE AND AN ERODIBLE BED*. Techn. Ber. Nr. 39, Lyngby, DK: Institute of Hydrodynamics und Hydraulic Engineering, DTU.
- Menzel, P., Leder, A. & Schreier, S., (2016). Kolkbildung im Umfeld eines Monopile-Fundaments. In Egbers, C., Ruck, B., Leder, A. & Dopheide, D., eds. *Proceedings der 21. GALA-Fachtagung "Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik"*, 3.-5. September 2013. Cottbus, 2016. ISBN: 978-3-9816764-2-6, ISSN: 2194-2447.
- Sumer, B.M., Truelsen, C., Sichman, T. & Fredsøe, J., (2001). Onset of scour below pipelines and self-burial. *Coastal Engineering, Volume 42, Issue 4*, pp.313-35.
- Whitehouse, R., (1998). *Scour at marine structures - A manual for practical applications*. London: Thomas Telford.
- Whitehouse, R., Sutherland, J., Powell, K. & Harris, J., (2014). Fast Flow Facility for Sediment and Morphology testing. In *Coastlab 14*, pp. 104-113., 2014.