

## Kolkbildung im Umfeld eines Monopile-Fundaments

P. Menzel<sup>1</sup>, A. Leder<sup>2</sup>, S. Schreier<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Universität Rostock, Lehrstuhl für Meerestechnik

<sup>2</sup>Universität Rostock, Fakultät für Maschinenbau und Schiffstechnik  
Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock

### Motivation

Bei den erneuerbaren Energien kommt der Windenergie eine hohe Bedeutung zu. Im Offshore-Bereich sind die energetischen Verhältnisse durch stetigere und kräftigere Winde deutlich besser als an Land. Auf See trifft man jedoch auf neue Herausforderungen, die an Land nicht zu berücksichtigen sind, unter anderem bei der Gründung von Offshore-Bauwerken. Die Erosion von Sediment im Umfeld von Offshore-Fundamenten kann die Standsicherheit der gegründeten Strukturen stark gefährden und die strukturellen Eigenschaften der Gesamtkonstruktion stark beeinflussen. Untersuchungen zu den Ursachen der Erosion sind somit unerlässlich und stellen die Grundlage für zukünftige Verbesserungen zum Kolkenschutz dar. In Laborversuchen an einem Modell eines Monopile-Fundaments sollen die Kolkwirkungen sowie die verantwortlichen Strömungsstrukturen bestimmt werden. Anhand dieser Erkenntnisse sollen in einer späteren Projektphase Maßnahmen entwickelt werden, um die für die Kolkprozesse verantwortlichen Strömungsstrukturen zu unterdrücken.

### Stand der Forschung

Im Bereich des Bauingenieurwesens wird die Umströmung zylindrischer Fundamente bereits seit vielen Jahren untersucht, wobei die Fragestellung meist von den Gründungsstrukturen für Brücken herrührt. In der Mehrzahl der diesbezüglichen Publikationen geht es um die Beschreibung der Ausbildung von Kolk (Erosionsgebieten) im Umfeld der Fundamente.

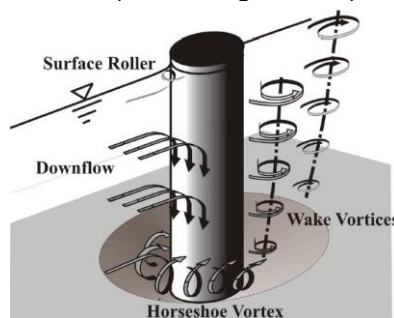
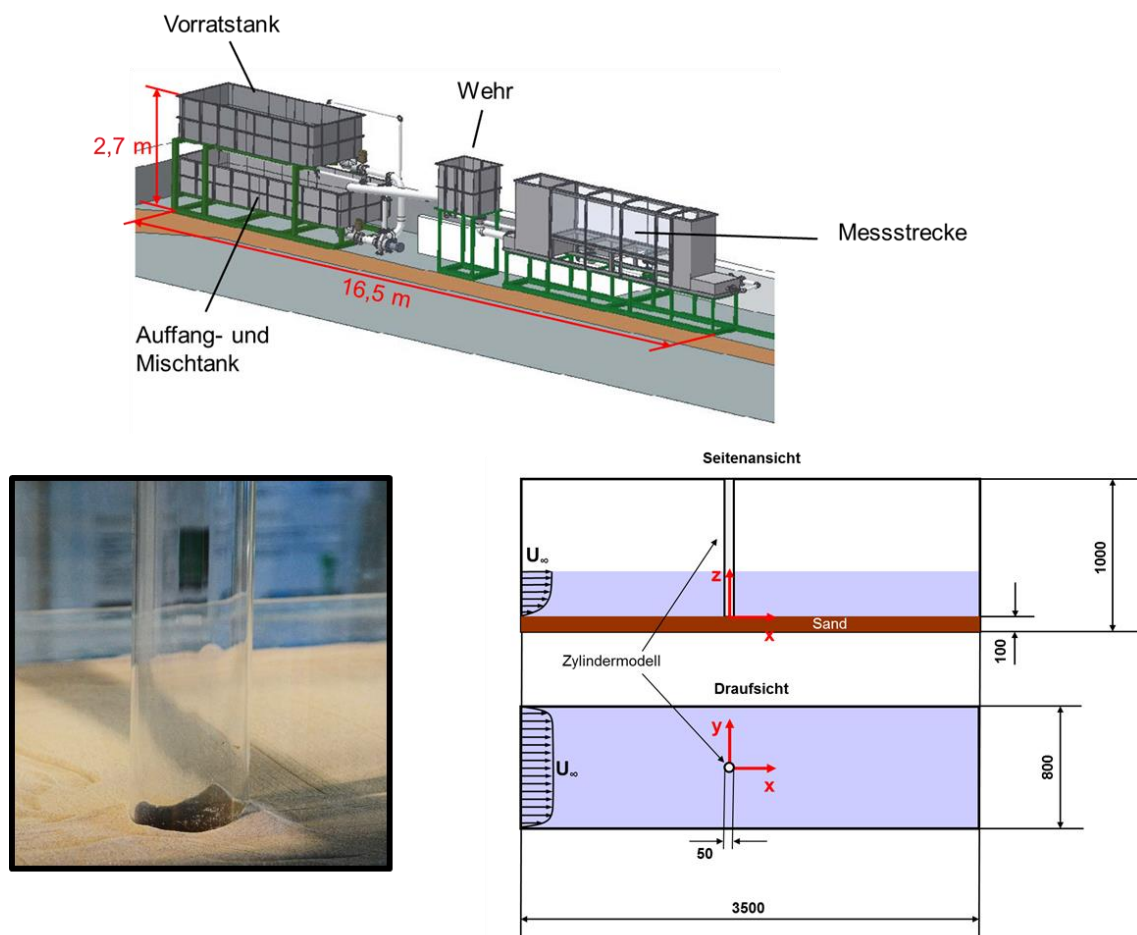


Abb. 1: Wirbelstrukturen im Umfeld eines Zylinderfundaments nach Melville (2008).

Eine gängige und allgemein akzeptierte sowie oft zitierte Erklärung für die auftretenden Strömungsstrukturen findet sich in Abb. 1 nach Melville (2008). Allein die Darstellung wechselseitig ablösender Wirbel, wie sie u.a. nach Griffin (1985) und Kappler (2002) in gescherten Strömungen nicht auftreten, lässt vermuten, dass es hier noch Forschungsbedarf gibt. Eine Zusammenstellung der in der Literatur gängigen Gleichungen zur Bestimmung der Kolk-tiefen findet sich in DIAB (2011).

## Versuchsaufbau

Die Versuche wurden im Wasserkanal des Lehrstuhls für Strömungsmechanik der Universität Rostock durchgeführt, wobei das Modell mittig in der Messstrecke angeordnet wurde. Die Abmessungen des Versuchsaufbaus, sowie die Anordnung des Zylindermodells sind Abb. 2 sowie Menzel (2010) zu entnehmen. Der in den Versuchen ausgewählte Silikatsand hatte einen Korndurchmesser von  $0,1 \text{ mm} < d_k < 0,3 \text{ mm}$ , womit dessen Bewegungsbeginn bereits bei besonders niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten eintritt. Genauere Abhandlungen zum Bewegungsbeginn von Sediment finden sich u.a. in Hjulstrøm (1935), Shields (1936), Meyer-Peter & Müller (1949), Günter (1971) und Menzel & Leder (2011). Mit dem verwendeten Sand konnte gewährleistet werden, dass es im Umfeld des Zylindermodells zur Erosion im Bodenbereich kommen kann, wobei der Sand als Bodenfracht und in Suspension transportiert werden kann. Generell unterscheidet man bei Versuchen zum Sedimenttransport zwischen „Clear Water“ und „Live Bed“. Im „Clear Water“-Fall kommt es in der störungsfreien Umgebung gerade noch nicht zum Sedimenttransport, wohingegen beim „Live Bed“-Fall auch fern des Objektes Sedimenttransport auftritt, meist in Form von Bodenfracht.



**Abb. 2: Versuchskanal und Messstrecke sowie Koordinatensystem.**

Visuell lassen sich beide Situationen sehr gut unterscheiden, da der Ausgangszustand des eben präparierten Sedimentbettes im Falle der „Clear Water“-Versuche in weiten Teilen des Versuchskanals erhalten bleibt, wobei es im „Live Bed“-Versuch im gesamten Kanal zur Ausbildung von Rippelstrukturen kommt. In Sumer & Fredsøe (2002) wird jedoch gezeigt, dass die maximal erreichten Kolk-tiefen weitgehend unabhängig davon sind, ob sie im „Clear Water“-Fall oder im „Live-Bed“-Fall erzielt wurden. Die hier beschriebenen Laborversuche wurden unter „Live-Bed“-Bedingungen durchgeführt, da sich in diesem Fall die Versuchsdauern deutlich reduzieren lassen.

Die Strömungsmessungen wurden an einem Zylindermodell mit dem Durchmesser  $D = 5 \text{ cm}$  mit Hilfe eines  $15 \text{ Hz}$  – PIV-Messsystems durchgeführt, während die Vermessung der Bodenstruktur unter Anwendung einer Lichtfeldkamera vorgenommen wurde. Zur genaueren Bestimmung des Hufeisenwirbels in Bodennähe wurden die Laserlichtschnitte in  $x$ - $z$ -Ebenen angeordnet. Um auch Messungen innerhalb des zu erwartenden Kolkloches durchführen zu können, musste die Kamera um etwa  $8 \text{ Grad}$  geneigt werden. Aus einfachen geometrischen Überlegungen ergibt sich hierbei eine Genauigkeit von über  $99 \%$ , wenn die Geschwindigkeitskomponente in  $y$ -Richtung (quer) vernachlässigbar klein ist. Im Falle einer signifikanten Querkomponente sinkt die Genauigkeit leicht. Eine Darstellung des Messaufbaus findet sich in Abb. 3.

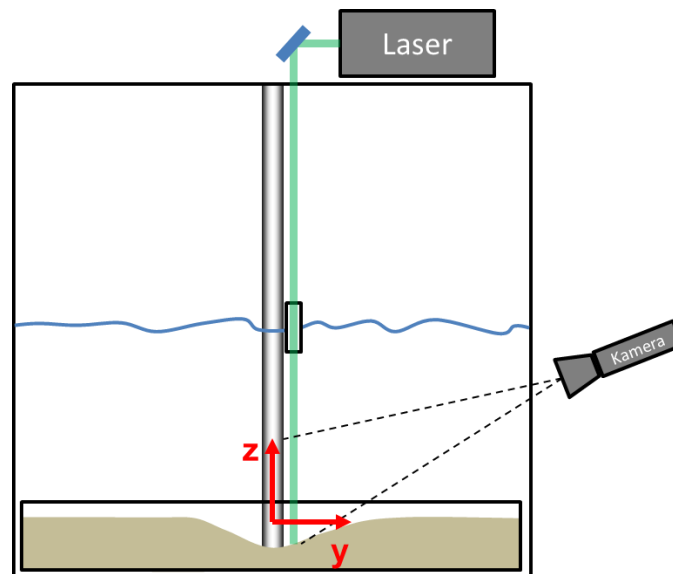
Die Messebenen sind in Abb. 4 dargestellt. Somit sollte eine Darstellung des Hufeisenwirbels in der Anströmung sowie im Strömungsfeld des nahen Nachlaufs möglich sein. In allen Messebenen wurden jeweils  $1024$  Zwei-Komponenten-Geschwindigkeitsfelder gemessen und analysiert. Zur Bestimmung der Querkomponente der Strömungsgeschwindigkeit wurde die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad [1]$$

umgeformt und als Integral

$$w = \int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial w}{\partial z} dz = \int_{z_1}^{z_2} \left( -\frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y} \right) dz \quad [2]$$

verwendet.



**Abb. 3: Anordnung der PIV-Messtechnik.**

Bei der Integration wurde davon ausgegangen, dass die Querkomponente  $v$  in der Symmetrieebene im zeitlichen Mittel verschwindet.

Neben der Vermessung des mittleren Strömungsfeldes zur Erstellung eines Volumendatensatzes wurden auch PIV-Messungen im Zylindervorlauf bei  $y/D = 0,0$  während das Kolkvorgangs durchgeführt. Hierzu wurden in mehreren Messungen jeweils  $150$  Doppelbilder mit einer Bildwiederholrate von  $15 \text{ Hz}$  aufgenommen. Die Mittelwertbildung

ergibt somit ein Bild über das quasistationäre Strömungsfeld innerhalb der jeweiligen Messdauer von 10 Sekunden. Diese Messungen wurden in einem zeitlichen Abstand von einer Minute durchgeführt, sodass eine zeitliche Veränderung des quasistationären Geschwindigkeitsfeldes über einen Zeitraum von insgesamt 80 Minuten dargestellt werden konnte.

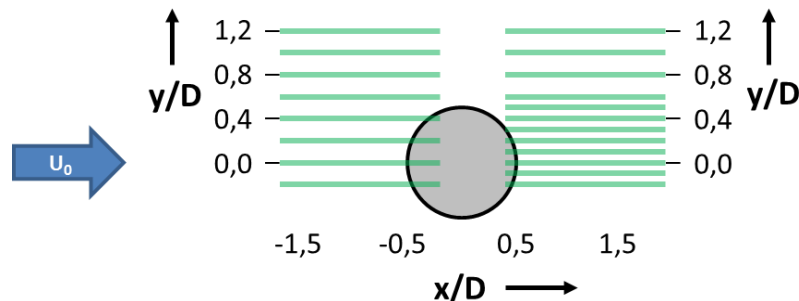


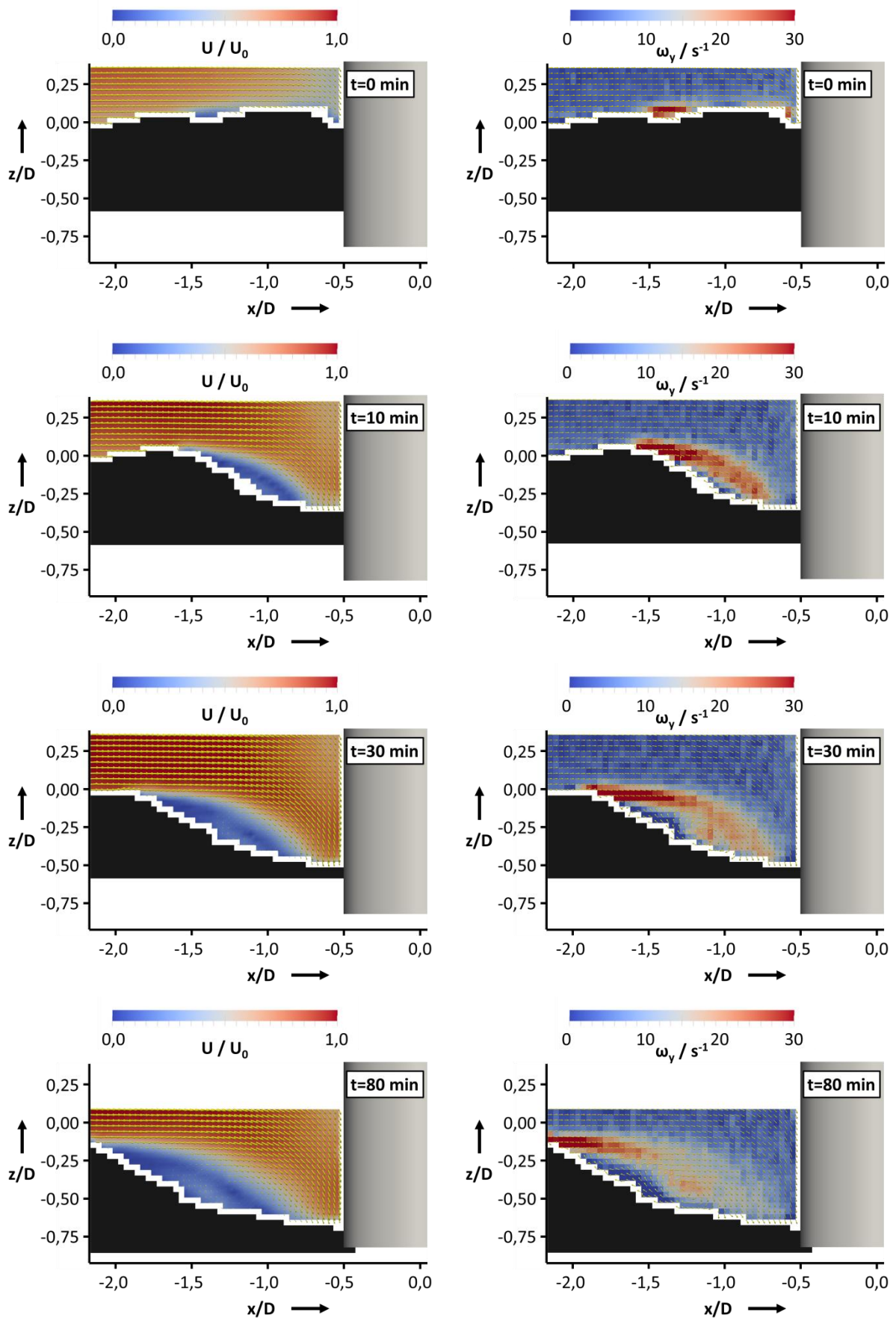
Abb. 4: Darstellung der Messebenen.

## Ergebnisse

Der zeitliche Verlauf der mittleren Strömungsgeschwindigkeit, der Wirbelstärke sowie der Bodenstruktur bei  $y/D = 0,0$  im Zylindervorlauf ist für unterschiedliche Zeitpunkte in Abb. 5 dargestellt. Bereits direkt nach Beginn der Messungen, zum Zeitpunkt  $t = 0$  min, sind vor dem Zylinder kleine Rippelstrukturen erkennbar. Der zu erwartende Hufeisenwirbel ist zu diesem Zeitpunkt noch sehr klein und war im Versuch nicht mit dem Messsystem auflösbar. Bereits nach wenigen Sekunden jedoch bildet sich dieser deutlich aus und sorgt sofort für die Erosion von Sediment. Zum Zeitpunkt  $t = 10$  min hat sich bereits ein Kolkgraben gebildet. Der Hufeisenwirbel ist deutlich anhand der normierten Geschwindigkeitsvektoren zu erkennen (Abb. 5 rechts). Zu diesem Zeitpunkt ist sein Umfang ähnlich dem des Zylindermodells, wobei sich der Wirbelkern bei etwa  $x/D = -0,5$  nahe über dem Boden befindet. Die Wirbelstärke nimmt in diesem Zeitraum ihre Maximalwerte an. Mit zunehmender Versuchszeit wird das Kolkloch länger und tiefer, bis es eine Kolktiefe von etwa  $z/D = 0,75$  erreicht. Mit zunehmender Ausbildung des Kolkloches verringert sich die Wirbelstärke leicht. Dabei verlagert sich der Wirbelkern weiter stromauf nach etwa  $x/D = -1,2$ . Der Abstand des Wirbelkerns zum Boden wächst ebenfalls leicht. Dies lässt auf eine starke Vergrößerung des Hufeisenwirbels schließen. Entsprechend der Drehimpulserhaltung reduziert sich hiermit einhergehend die Wirbelstärke. Aufgrund der zunehmenden Lauflänge vom Staupunkt des Wirbels am Boden entgegen der Anströmrichtung nimmt die Dicke der Grenzschicht zu, was i.d.R. zu einer Abnahme der Wandschubspannung am Boden und somit zur Reduzierung der Erosionsvorgänge führt.

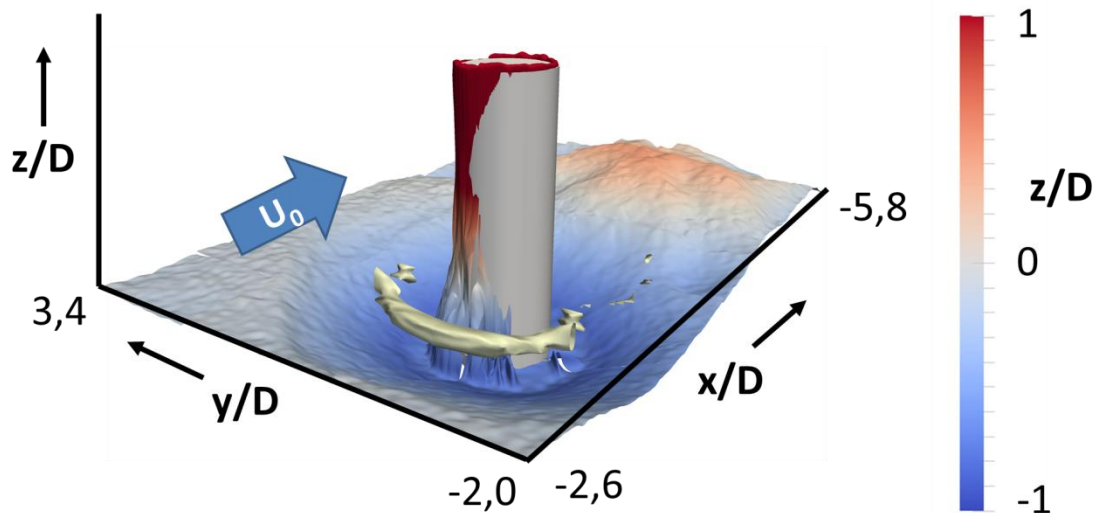
Nach etwa 90 min Versuchszeit konnte keine signifikante Veränderung der Bodenstruktur mehr festgestellt werden. In diesem Gleichgewichtszustand wurde das Geschwindigkeitsfeld als Volumendatensatz vermessen. Im Anschluss wurde die ausgebildete Bodenstruktur mit Hilfe einer Lichtfeldkamera detektiert. Abb. 6 zeigt die entstandene Kolkstruktur, wobei eine maximale Kolktiefe von  $z/D = 1,0$  feststellbar ist. Die Ausdehnung des Kolkloches reicht in Strömungsrichtung bis etwa  $x/D = -2,6$  und seitlich bis etwa  $y/D = \pm 2,6$ . Im nahen Zylindernachlauf bildet sich ein Akkumulationsgebiet für Sediment aus. Die Bodenerhöhung bildet sich mit etwa  $z/D = 0,4$  aus.

Neben der Bodenstruktur ist der Verlauf des Hufeisenwirbels anhand einer Isofläche des  $Q$ -Kriteriums als beige Fläche eingezeichnet. Ursächlich verantwortlich für die Ausbildung des Kolkloches im Zylindervorlauf ist der Hufeisenwirbel. Die Erosion seitlich des Zylinders ist ebenfalls auf den Hufeisenwirbel zurückzuführen. Die Erosion wird durch eine erhöhte Strömungsgeschwindigkeit in der seitlichen Umströmung des Zylinders unterstützt, verursacht durch die Verdrängungswirkung des Zylinders.



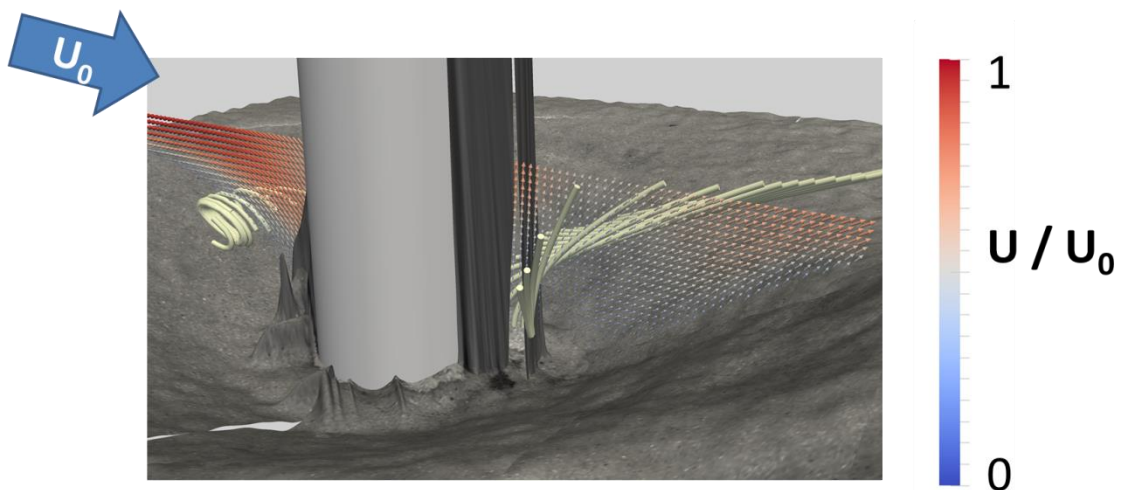
**Abb. 5: Strömungsgeschwindigkeit und Geschwindigkeitsvektoren (links) sowie Wirbelstärkekomponente in y-Richtung mit normierten Geschwindigkeitsvektoren (rechts).**





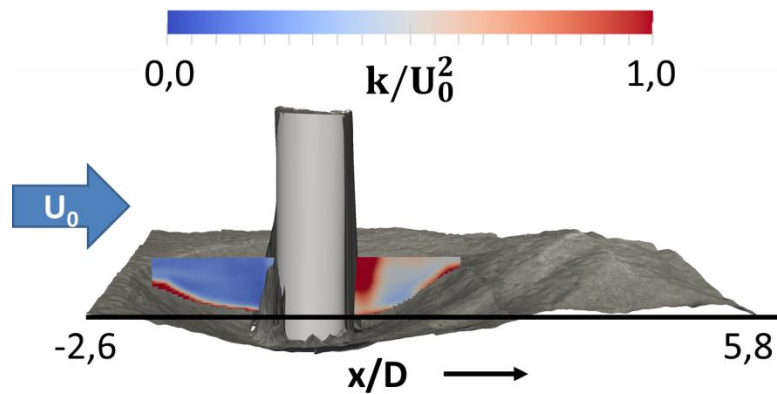
**Abb. 6: Bodenstruktur im Gleichgewichtszustand sowie Q-Kriterium als Einhüllende des Hufeisenwirbels.**

Eine Erklärung für die Erosion im Zylindernachlauf liefert Abb. 7. Dargestellt sind Geschwindigkeitsvektoren in der Mittelebene ( $y/D = 0,0$ ) sowie Stromlinien (beige) in der Anströmung und Nachlauf. Die Geschwindigkeitsvektoren im Nachlauf zeigen eine deutlich aufwärts gerichtete Strömung im Bereich des Kolkloches im Nachlauf. Die Stromlinien zeigen die seitliche Umströmung inklusive der aufwärts gerichteten Strömung. Im zeitlichen Mittel lässt sich kein Rezirkulationsgebiet im Zylindernachlauf detektieren, welches eine eventuelle Akkumulation begünstigen würde. Dies legt nahe, dass die seitliche Umströmung ausreichend weit in den nahen Nachlauf hineinreicht, um dort Sediment zu erodieren und aus dem Kolkloch heraus zu transportieren.



**Abb. 7: Bodenstruktur im Umfeld des Zylindermodells, Geschwindigkeitsvektoren in einer Ebene bei  $y/D = 0$  sowie Stromlinien im Vor- und Nachlauf der Zylinder.**

Ein weiterer Anhalt für das Auftreten von Erosion stellt eine erhöhte turbulente kinetische Energie dar. Vor allem im nahen Zylindernachlauf sind Gebiete erhöhter Turbulenz nachzuweisen, was in Abb. 8 anhand der Symmetrieebene  $y/D = 0,0$  aufgezeigt ist. Nahe des Bodens aber auch im nahen Nachlauf des Zylinders sind erhöhte Werte messbar.



**Abb. 8: Bodenstruktur im Umfeld des Zylindermodells, Geschwindigkeitsvektoren in einer Ebene bei  $y/D = 0$  sowie Stromlinien im Vor- und Nachlauf der Zylinders.**

## Zusammenfassung

Im Rahmen der Laborversuche konnte der zeitliche Verlauf des Kolkvorgangs in Abhängigkeit von der Ausprägung des Hufeisenwirbels bestimmt werden. Diese charakteristische Strömungsstruktur im Umfeld des Zylinderfundamentes konnte mit der auftretenden Kolkstruktur in Verbindung gebracht werden. Die Lichtfeldkameratechnik wurde erfolgreich eingesetzt, um die Bodenstruktur zu vermessen.

## Literatur

- DIAB, R.M.A.E.A., (2011). *Experimental Investigation on Scouring around Piers of different Shape and Alignment in Gravel*. Darmstadt.
- Griffin, O.M., (1985). The Effects of Current Shear no Vortex Shedding. In *Proc. Int. Symp. on Separated Flow Around Marine Structures*. Trondheim, Norway, June 26-28, 1985. The Norwegian Inst. of Technology.
- Günter, A., (1971). *Die kritische mittlere Sohlenschubspannung bei Geschiebemischungen unter Berücksichtigung der Deckschichtbildung und der turbulenzbedingten Sohlenschubspannungsschwankungen*. ETH Zürich. Dissertation.
- Hjulstrøm, F., (1935). Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. *Bull. of the Geol. Inst. of Uppsala*, pp.219-527.
- Kappler, M., (2002). *Experimentelle Untersuchung der Umströmung von Kreiszyklindern mit ausgeprägten dreidimensionalen Effekten*. Karlsruhe: Dissertation, Universität Karlsruhe.
- Melville, B.W., (2008). The physics of local scour at bridge piers. In *Proceeding of the 4th International Conference on Scour and Erosion. Vol. 57.*, 2008.
- Menzel, P., (2010). *Turbulente Mischungsvorgänge im Nachlauf einer dichtegesichteten 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.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R., (1949). Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. *Schweizerische Bauzeitung*, pp.29-32.
- Shields, A., (1936). Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung. *Mitteilung der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau*.
- Sumer, B.M. & Fredsøe, J., (2002). *The Mechanics of Scour in the Marine Environment*. World Scientific Publishing Co Pte Ltd. Advanced Series on Ocean Engineering; No. 17.