

Experimentelle und Numerische Untersuchungen der Umströmung einer versandeten Struktur

Experimental and Numerical Investigations of the Flow Regime Around Submerged Structures

T. Rückborn, P. Menzel, A. Leder

Universität Rostock, Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Straße 2, 18051 Rostock
in Kooperation mit dem Steinbeis-Transferzentrum für Strömungstechnik (SU 643)

PIV, Simulation, Rippel, Kolk, OpenFOAM, DES
PIV, simulation, ripple, scour, OpenFOAM, DES

Zusammenfassung

Am Lehrstuhl Strömungsmechanik wurden Versandungsversuche im Wasserkanal an einem endlichen, gleichmäßig angeströmten, liegenden Zylinder im Modellmaßstab ($Re = 1,5 \cdot 10^4$) durchgeführt. Diese beinhalten sowohl typische Rippel, als auch durch das Objekt hervorgerufene Kolklöcher. Da solche Strukturen im Naturmaßstab erst bei einer höheren Reynoldszahl ($Re = 1,5 \cdot 10^5$) entstehen, ist für Untersuchungen bei gleicher Reynoldszahl ein Wechsel zu Windkanalexperimenten erforderlich. Dazu wurde die im Wasserkanal ermittelte Bodenstruktur mit Hilfe eines 3D-Druckers repliziert und in einem Windkanal bei erhöhter Reynoldszahl entsprechend der Meeresbedingungen mittels PIV untersucht. Gleichzeitig stattfindende numerische Untersuchungen geben Hinweise auf die Lage der Wirbelstrukturen. Die experimentell ermittelten Daten stimmen mit denen der Simulation überein. Es stellt sich heraus, dass das Rezirkulationsgebiet im Vergleich zum unversandeten Zustand stark verkleinert und der vordere Hufeisenwirbel stark ausgeprägt ist. Die hohe Wandschubspannung im Kolkloch sorgt für ein Gleichgewicht der entstehenden Kolkstrukturen.

Einleitung

Die in der Vergangenheit vorgenommenen Untersuchungen hatten das Bestreben, die Strömungs- und Transportmechanismen um einen auf einem Sandbett quer zur Strömung liegenden endlichen Zylinder genauer zu verstehen (Menzel & Leder 2013, Rückborn et al. 2014). Dazu wurden experimentelle Versuche durchgeführt sowie ein numerisches Modell entwickelt. Ziel ist es, mit diesen Erkenntnissen teilversandete Objekte am Meeresboden detektieren zu können. Dazu zählen beispielsweise von den Weltkriegen übriggebliebene Seeminen oder verklappte Giftmüllfässer. Diese können mit Hilfe eines Sidescanars gefunden werden. Auf sandigen Böden, wie z.B. in Nord- und Ostsee, kann es durch lokale Strömungsverhältnisse zur Versandung von Objekten kommen. Damit wird die Aufspürung deutlich erschwert. Allerdings können sich markante Auskolkungen oder Rippelstrukturen bilden, die auf ein Objekt schließen lassen. Diese sind u. a. von der Strömungsgeschwindigkeit, der Sedimentbeschaffenheit sowie der Objektgeometrie abhängig. Durch Experimente und Simulationen ließe sich beispielsweise ein Katalog erstellen, mit dessen Hilfe diese Strukturen Objekten zugeordnet werden können. In der aktuellen Studie wurden Versandungsversuche in einem Wasserkanal durchgeführt. Hierbei wurde die dimensionslose Shields-Zahl Sh berücksichtigt. Diese charakterisiert den möglichen Bewegungsbeginn von Sedimentpartikeln auf dem Sandbett. So konnte im Wasserkanal

mit freier Wasseroberfläche ein Sedimenttransport im Modellmaßstab realisiert werden, der zu einem profilierten Sandbett führt. Die Reynoldszahl bei vergleichbaren Experimenten im Naturmaßstab kann im Wasserkanal allerdings nicht eingehalten werden. Ein Vergleich bei diesen unterschiedlichen Reynoldszahlen ergab jedoch eine weitestgehende Unabhängigkeit der Strömungs- und Kolkstrukturen von der Re-Zahl im untersuchten Wertebereich (Menzel & Leder 2013). Da die Rippelstrukturen im versandeten Zustand zeitlich und räumlich recht schnellen Veränderungen unterliegen, ist eine genauere Untersuchung mittels PIV im Wasserkanal nur schwer zu realisieren. Deshalb soll eine Momentaufnahme der Bodenstruktur mit dem Objekt im Windkanal untersucht werden. Dort kann dann auch eine in der Natur vorkommende Reynoldszahl eingehalten werden. Dazu wurde mittels eines Laserabstandssensors die Bodenstruktur samt Objekt über einen ausgewählten Bereich vermessen (Menzel et al. 2014). Aus den Daten konnte über die STL-Schnittstelle mit Hilfe eines 3D-Druckers eine verfestigte Replik des Sandbodens samt Objekt erstellt werden.

Eine numerische Simulation des Windkanalexperiments mit dieser Versandungsstruktur soll die Kenntnisse über die Strömungsstrukturen sowie der Wandschubspannung am Boden erweitern.

Experimentelle Methode

Das Bodenprofil wurde unter Berücksichtigung der Shieldszahl Sh zunächst im Wasserkanal erzeugt.

$$Sh = \frac{\tau_w}{(\rho_s - \rho) g d_k} \quad (1)$$

In die so entdimensionierte Wandschubspannung τ_w fließen die Dichte des Sandes und des Wassers ρ_s bzw. ρ sowie der Korndurchmesser d_k ein. Nach Shields (1936) kommt es ab einer kritischen Shields-Zahl (Sh_{cr}) zum Sedimenttransport. Dieser ist abhängig von der Kornreynoldszahl und somit vom Korndurchmesser. Ohne genauer auf den Verlauf von Sh_{cr} einzugehen, wurde der Korndurchmesser für das Experiment so gewählt, dass es möglichst schnell zum Sedimenttransport kommt. So wurde im Experiment eine Korndurchmesserbandbreite von 0,1 bis 0,3 mm gewählt. Die Reynoldszahl im Wasserkanal beträgt $1,5 \cdot 10^4$, bezogen auf den Zylinderdurchmesser. Zu Beginn des Experiments wurde der Sandboden waagrecht ausgerichtet und geglättet. Nach dem langsamen Befüllen mit Wasser wurde die Strömungsgeschwindigkeit zügig erhöht. Wie schon in Menzel & Leder (2013) dargestellt, kommt es zur Versandung des Zylinders. Nach 4 Stunden wurde ein quasistatischer Zustand erreicht. Dies bedeutet, dass es zu keiner weiteren Vertiefung des vor dem Zylinder befindlichen Kolklochs, oder Versandung des Zylinders gekommen ist. Nachdem das Wasser langsam abgelassen wurde, wurde mit Hilfe eines Laserabstandssensors der nun profilierte Sandboden samt Zylinder vermessen. Genauere Angaben zum Laserabstandssensor lassen sich in Menzel et al. (2014) finden.

Die so ermittelte rechteckige Fläche reicht 9 Zylinderdurchmesser stromauf, 12 stromab und jeweils 5 Zylinderdurchmesser zu beiden Seiten. Mit geeigneter Software wurde aus diesen Punkten eine STL-Datei erstellt, der weitere Punkte durch Interpolation hinzugefügt wurden. Damit sich die spätere Platte über die gesamte Windkanalbreite erstrecken kann, wurden die seitlichen Ränder gespiegelt und die Gesamtfläche nochmals um jeweils 1 Zylinderdurchmesser verbreitert. So werden etwaige Randeinflüsse vermieden. Damit es beim Übergang der freien Anströmung auf die Platte zu keinen Ablösephänomenen kommt wurde die Vorderkante noch abgerundet. Abbildung 1 zeigt das STL-Modell der 3D-gedruckten Platte.

Das Experiment im Windkanal wurde bei einer Reynoldszahl von $1,5 \cdot 10^5$ durchgeführt. Die Re-Zahl war somit eine Größenordnung höher als im Wasserkanalexperiment. Damit liegt dieses Experiment im Bereich des Naturfalls. Durch die numerischen Untersuchungen, auf die noch eingegangen wird, konnte das Messgebiet auf einen relativ kleinen aber aussagekräftigen Bereich eingegrenzt werden. So kommt es, wie auch bei der ebenen Bodenplatte, zu

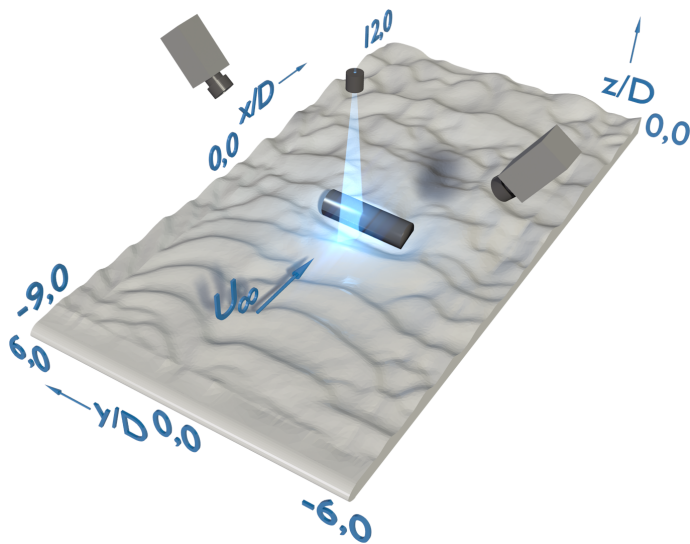


Abb. 1: Experimenteller Aufbau

einer Ausbildung eines Hufeisenwirbels vor dem Zylinder (vgl. Menzel & Leder 2014). Dieser soll zur Validierung der numerischen Simulation herangezogen werden. Die Messungen wurden mittels Time-Resolved Stereo PIV-Verfahren durchgeführt. Der Windkanal sowie das Messsystem sind ausführlich in Jensch (2011) beschrieben. Der Messaufbau ist Abbildung 1 zu entnehmen. Es wurde eine Messebene untersucht. Diese liegt in der x-z-Ebene bei $y/D = 0$ im Bereich des Hufeisenwirbels. Die Wiederholrate der Messung beträgt 1 kHz. Es wurden 3072 Geschwindigkeitsfelder aufgenommen.

Numerische Methode

Die numerische Simulation basiert auf den Kenntnissen früherer Arbeiten (siehe auch Rückborn et al. 2014). Hierzu wurde eine DES durchgeführt, welche ein Hybrid aus einer RANS und LES darstellt (Fröhlich 2006). Wie auch bei dem Windkanalexperiment liegt die untersuchte Reynoldszahl bei $1,5 \cdot 10^5$. Die Simulationen erfolgen instationär mit einer Mittellungszeit von 2 s, da es ab diesem Zeitpunkt zu keinen weiteren Veränderungen der Mittelwerte kommt. Nach Empfehlung von Frederich (2010) wurde die Rechendomäne zuvor sechs mal durchströmt. So sind vollständig entwickelte Strömungsstrukturen gewährleistet.

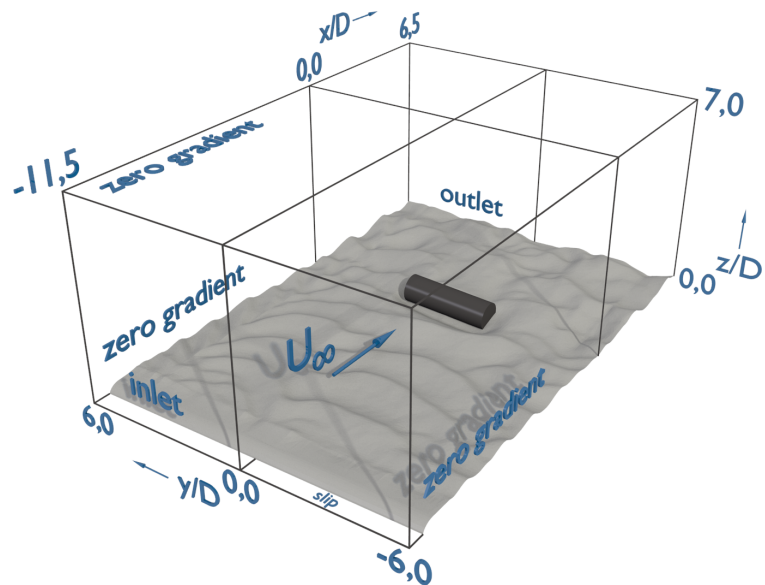


Abb. 2: Domain der numerischen Simulation

Die Domäne mit den grundlegenden Randbedingungen ist in Abbildung 2 dargestellt. Das abgebildete Bodenprofil entspricht dem des Experiments. Die Anströmkannte wird ebenfalls simuliert. Mit einer Gitterauflösung von 4,4 Mio. Zellen werden y^+ -Werte von etwa 30 erreicht. Damit muss die Wandgrenzschicht vollständig modelliert werden. In die Bestimmung der Wandschubspannung gehen somit Modellierungsanteile ein. Für eine LES wären y^+ -Werte von höchstens 5 zulässig, da ab diesem Punkt die laminare Grenzschicht beginnt und somit auf eine Modellierung verzichtet werden könnte (Schlichting & Gersten 2006). Dies ist der Grund für die Auswahl des DES-Verfahrens. Bei der Erstellung der Gitter wurde deutlich, dass die Vernetzung des Bodens die meisten Rechenkapazitäten verlangt. Der Anteil der bodennahsten Zellschicht beträgt beispielsweise 10 % des gesamten Zellanteils.

Ergebnisse

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse der PIV-Aufnahme. Der messbare Bereich ist aufgrund der Rückwärtsstreuung und der Reflexionen an der Bodenplatte sehr eingeschränkt. Die Vektorpfeile kennzeichnen mit ihrer Länge und Richtung die Geschwindigkeit in der xz -Ebene. Im Bereich des vermuteten Hufeisenwirbels ist ein Beginn der Drehung in Abwärtsrichtung zu erkennen. Die Farbkontur stellt die Strömungsquerkomponente u_y dar. Zur besseren Vergleichbarkeit ist diese auf die Bandbreite der numerischen Simulation aus Abbildung 4 skaliert. Die hier gemessene Querkomponente der Geschwindigkeit beträgt bis zu 25% der Anströmgeschwindigkeit. In Abbildung 4 der numerischen Simulation ist der Hufeisenwirbel deutlich zu erkennen. Es entsteht eine starke hangaufwärts gerichtete Gegenströmung im Kolkoch. Diese erreicht das 1,25fache der Anströmgeschwindigkeit. Die Vektoren des Experiments stimmen mit denen der Simulation gut überein. Auch die ermittelte Querkomponente lässt auf eine korrekte Simulation schließen. In der Simulation beträgt diese am Punkt der maximalen Kolkttiefe bis zu 80% der Anströmgeschwindigkeit. Abbildung 5 zeigt den durch Stromlinien und einer Isofläche des Q-Kriteriums gekennzeichneten Hufeisenwirbel der numerischen Simulation. Es zeigt sich eine leichte Asymmetrie. Diese kann durch die Kolkgeometrie und die leichte Schräglage des Zylinders ($1-2^\circ$ Verkippung) entstanden sein. Dies erklärt auch die auftretenden Querkomponenten, die sowohl im Experiment als auch in Abbildung 3 erkennbar sind. Die Rezirkulationsgebiete der numerischen Simulation sind in Abbildung 6 dargestellt. Hier zeigt sich, dass am Zylinder sowie im Nachlauf größerer Rippel vereinzelt Rezirkulationsgebiete entstehen. Aufgrund der Versandung hat sich die Rezirkulationszone hinter dem Zylinder deutlich verkleinert. Liegt der Zylinder, im unversandeten Zustand auf einer ebenen Platte reicht das Rezirkulationsgebiet bis etwa 3 Zylinderdurchmesser hinter den Zylinder (Vergleich Menzel & Leder 2014). Hier reicht die Rezirkulationszone in den Randbereichen des Zylinders nur bis 1,25 Zylinderdurchmesser. Weiterhin scheint bei weiterer Versandung eine Trennung des Gebietes in zwei Teile bevorzuzustehen.

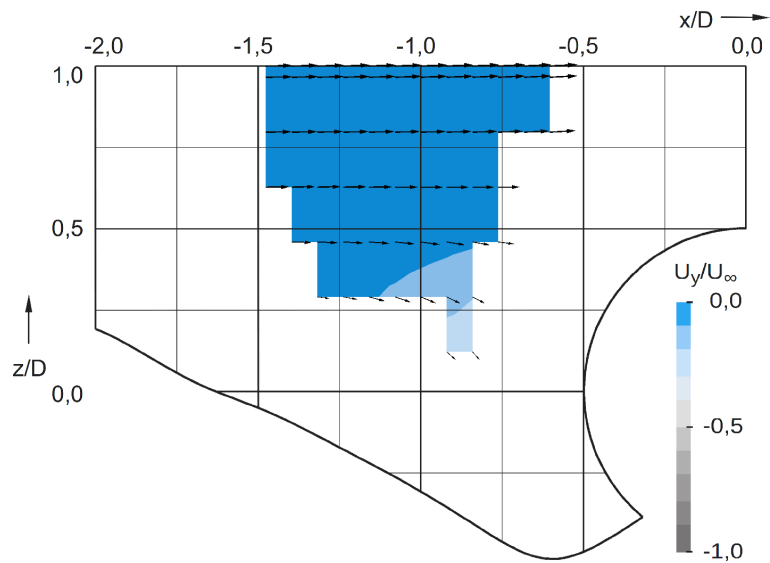


Abb. 3: Bereich des Hufeisenwirbels: Experiment

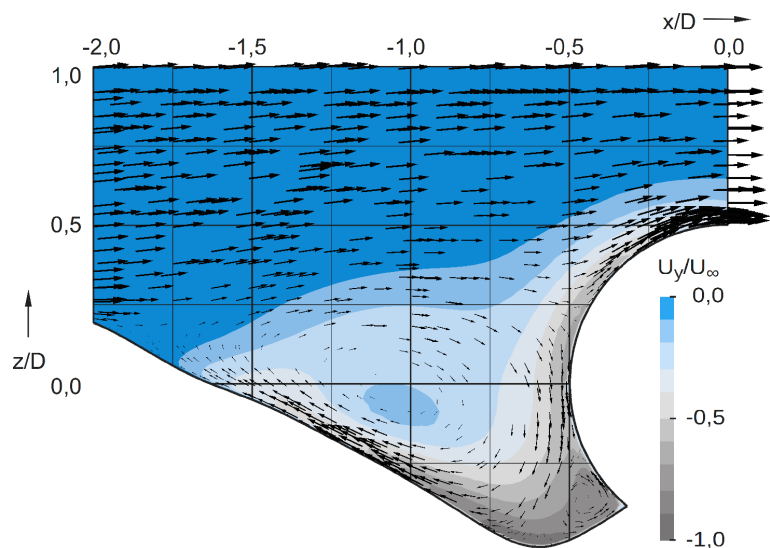


Abb. 4: Bereich des Hufeisenwirbels: Simulation

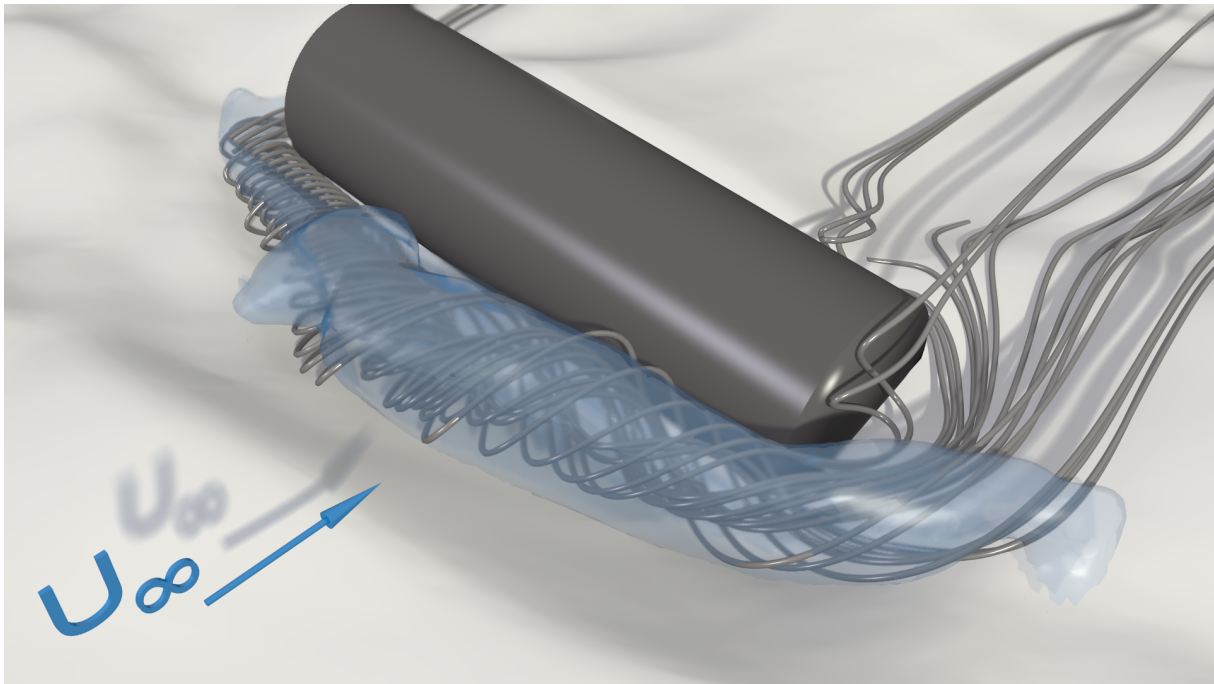


Abb. 5: Stromlinien und Q-Kriterium: Simulation

Hinweise auf Erosions- und Akkumulationsgebiete sind in Abbildung 7 zu finden. So kommt es bei ausreichend hoher Wandschubspannung τ_w zur Abtragung von Material. Da die Rippel im Wasserkanalexperiment dauerhaft einer Dynamik unterzogen waren, muss auch auf den Rippelkämmen eine erhöhte Wandschubspannung vorzufinden sein. Im Kolkloch vor dem Zylinder liegt ebenfalls eine stark erhöhte Wandschubspannung vor. So könnte auch hier von einer Materialabtragung ausgegangen werden. Allerdings kam es im Wasserkanalexperiment zu keiner weiteren Versandung bzw. Vertiefung des Kolks. Wenn jedoch an der Böschung des Kolklochs ständig Material nachrutscht, findet hier ein dauerhaften Materialtransport statt, der in der Summe zu einer konstanten und somit maximalen Kolktiefe führt. Aufgrund der Hangneigung wird auch die kritische Shieldszahl Sh_{cr} steigen. Dies führt zur Begrenzung der Sedimenttransportrate. Im Nachlaufbereich des Zylinders lässt sich ein großer Bereich minimaler Wandschubspannung finden. Material, welches durch Suspension in diesen Bereich transportiert wird, kann sich dort ablagern und führt zu der beobachteten Akkumulation. Der gleiche Prozess ist in den Rippeltälern wiederzufinden und führt zur Rippeldynamik.

Zusammenfassung und Ausblick

Ein mit einem Laserabstandssensor aufgenommenes Bodenprofil eines versandeten Objektes samt Rippelmarken wurde erfolgreich mit einem 3D-Drucker repliziert. Mit Hilfe von PIV-Technik wurde der Bereich vor dem Zylinder vermessen. Aufgrund starker Reflexionen an der Bodenplatte konnte nur ein kleiner Datensatz generiert werden. Gleichzeitig durchgeführte Simulationen stimmen mit experimentellen Daten überein. Die numerische Simulation bestätigt die Existenz des Hufeisenwirbels. Dieser ist deutlich

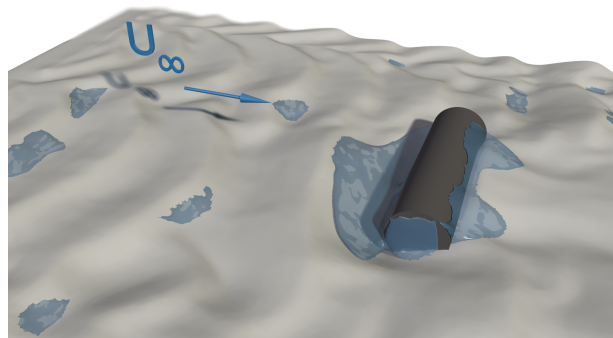


Abb. 6: Rezirkulationsgebiete: Simulation

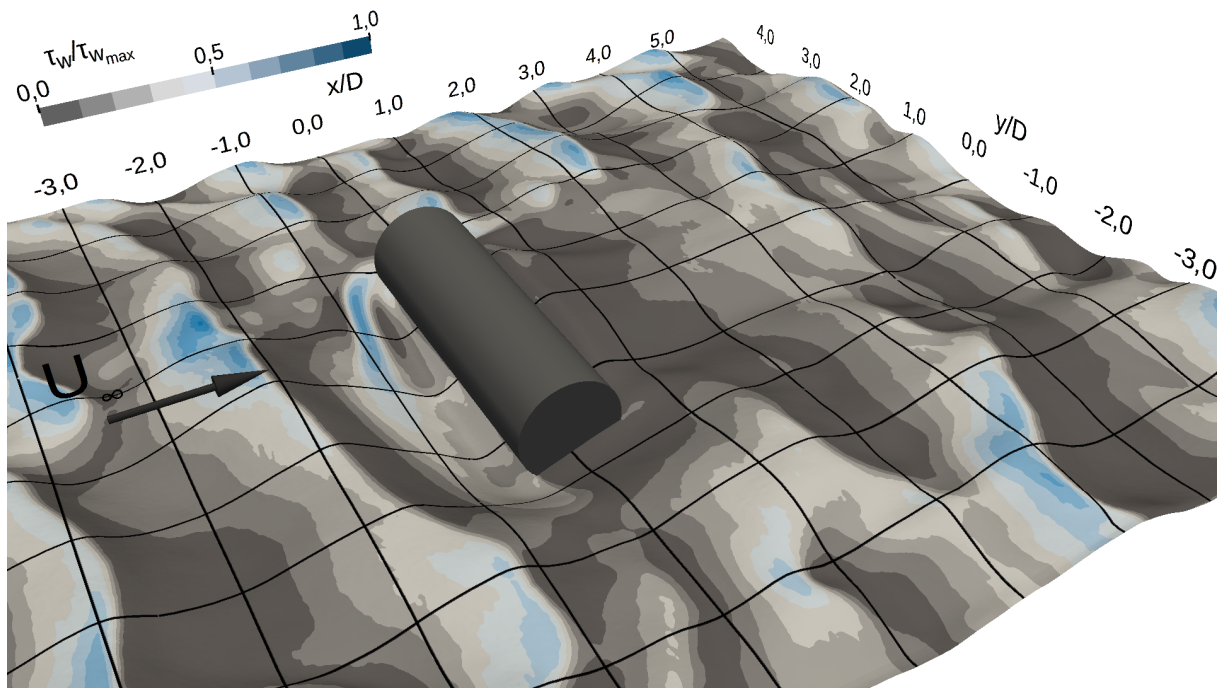


Abb. 7: Wandschubspannung: Simulation

ausgeprägt. Im Nachlauf der Rippel und des Zylinders sind kleine Rezirkulationsgebiete vorhanden. Das Rezirkulationsgebiet hinter dem Zylinder ist deutlich kleiner als im Fall der ebenen Platte. Die ermittelte Wandschubspannung ist im Bereich des Kolklochs vor dem Zylinder besonders hoch. Beobachtungen ergaben jedoch eine begrenzte Kolktiefe.

Um die numerische Simulation endgültig validieren zu können, muss der Hufeisenwirbel besser vermessen werden. Dies soll mit Hilfe von LDA-Technik geschehen. Die genauen Sedimenttransportprozesse im Kolkloch müssen eingehend untersucht werden. Dafür sind weitere Simulationen zur Bestimmung der Shieldszahl und der kritischen Shieldszahl notwendig.

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. Dank gilt weiterhin Herrn Dr. Wolter für die Laserabstandsmessung des Bodenprofils sowie dem Lehrstuhl Fluidtechnik und Mikrofluidtechnik für die Erstellung des 3D-gedruckten Rippelprofils.

Literatur

Frederich, O., 2010: "Numerische Simulation und Analyse turbulenter Strömungen am Beispiel der Umströmung eines Zylinderstumpfes mit Endscheibe,, Universitätsverlag der TU Berlin, ISBN: 978-3-7983-2241-7

Fröhlich, J., 2006: "Large Eddy Simulation turbulenter Strömungen,, Teubner, 1. Auflage

Jensch, M., 2011: "Strömungsanalysen zur Erfassung von Struktur und Dynamik turbulenter Nachlaufströmungen,, MENZEL-Verlag, Ostseebad Kühlungsborn, ISBN 978-3-9813444-1-7

Menzel, P., Leder, A., 2013: "Kolkbildung im Umfeld zylindrischer Objekte sowie deren Versandung im Wasserkanalexperiment,, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 21. Fachtagung 2013, München, Hrsg.: Kähler, C. J., Hain, R., Cierpka C., Ruck, B., Leder, A., Dopheide, D., pp. 44-1 - 44-8

Menzel, P., Perwaß, C., Petersen, A., Pinnow, A., Wietzke, L., Wolter, A., Leder, A., 2014: "Erprobung eines neuartigen Lichtfeldkamera-Messsystems zur gleichzeitigen Messung von 3D-3C-Geschwindigkeitsfeldern sowie einer 3D-Oberflächenkontur.", Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 22. Fachtagung, Karlsruhe, Hrsg.: Ruck, B., Gromke, C., Klausmann, K., Leder, A., Dopheide, D., pp. 7-1 - 7-9

Rückborn, T., Menzel, P., Leder, A., 2014: "Numerische Simulation des Sedimenttransports im Modellmaßstab,, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 22. Fachtagung, Karlsruhe, Hrsg.: Ruck, B., Gromke, C., Klausmann, K., Leder, A., Dopheide, D., pp. 20-1 - 20-8

Schlichting, H., Gersten K., 2006: "Grenzschichttheorie", Springer-Verlag, 10. überarbeitete Auflage

Shields, A., 1936: "Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung,, Mitteilung der preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Heft 26, Berlin