

## LDA-Untersuchungen an einer versandeten Struktur zur Validierung numerischer Daten

### LDA Measurements near a Submerged Structure to Validate Numerical Data

**T. Rückborn, A. Leder**

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

LDA, Simulation, Rippel, Kolk, OpenFOAM, DES

LDA, simulation, ripple, scour, OpenFOAM, DES

#### Zusammenfassung

Die Strömungsphänomene an versandeten Strukturen haben sich in früheren Untersuchungen als sehr komplex herausgestellt. Im Experiment wurde ein liegender Zylinder mit dem Durchmesser  $D$  und der Länge  $L$  auf einem Sandbett stationär angeströmt. Die Anströmrichtung ist senkrecht zur Zylinderachse. Die dabei entstehenden Kolklöcher und Rippel führen zu ausgeprägten Wirbelstrukturen. Eine Untersuchung mittels PIV (Rückborn et al. 2015) zeigte erste Anzeichen eines starken Hufeisenwirbels im Vorlauf des Zylinders. In dieser Arbeit wurden LDA-Messungen im Kolkloch durchgeführt. So konnte nicht nur die Messauflösung sondern auch der Messabstand zur Wand drastisch verbessert werden. Die Resultate zeigen einen deutlichen Wirbel sowie intensive Querströmungen entlang der Frontseite des Zylinders. Der Vollständigkeit halber wurden numerische Simulationen durchgeführt, die anhand des Experiments validiert werden konnten. Diese ermöglichten es, die Sedimenttransportrate zu bestimmen.

#### Einleitung

Die Bestrebung, einen endlichen, quer zur Strömung liegenden Zylinder zu untersuchen, ist eine wichtige Thematik. Zur Errichtung neuer Offshorewindparks in Nord- und Ostsee bedarf es einer eingehenden Untersuchung des betreffenden Meeresbodens. Im dortigen Sand können sich Seeminen und Munitionsreste aus den Weltkriegern oder auch verklappte Giftmüllfässer befinden. Durch die örtlichen Meeresströmungen können diese Objekte teilweise versanden. Dies macht das Auffinden mit einem Sidescan-sonar deutlich schwieriger, da womöglich nur noch ein kleiner Teil des Objekts aus dem Sand herausragt. Die auftretenden Strömungsstrukturen im Nahfeld des Zylinders lassen es zu, Rückschlüsse auf die Kolkstrukturen im direkten Umfeld zu ziehen. Weiterhin ließen sich bei Kenntnis der Umströmung Aussagen zum möglichen Versandungsverhalten ableiten. Ein Aufspüren von Gefahrgut wäre nun wahrscheinlicher, da die Suche auf charakteristische Kolkstrukturen am Meeresboden ausgedehnt werden kann. Die nötigen Kenntnisse sollen über Experimente sowie numerische Simulationen gewonnen werden. In einer bereits durchgeführten Studie (Rückborn et al. 2015) wurde der Hufeisenwirbel vor einem liegenden Zylinder untersucht. Dabei wurde ein Zylinder auf einem Sandbett im Wasserkanal konstant angeströmt. Die dabei entstandene Versandungsstruktur wurde mittels Laserabstandsvermessung und 3D-Drucktechnik repliziert. Hierdurch konnte diese Momentaufnahme eingehend im Windkanal untersucht werden. Das damals genutzte PIV-Verfahren konnte Ansätze eines Hufeisenwirbels aufzeigen. Interessant war die starke Querkomponente der Geschwindigkeit. Aufgrund von Rückwärtsstreuung und Reflexionen an der Bodenplatte war der

Messbereich eingeschränkt. In der aktuellen Studie soll die LDA-Methode genutzt werden, um den Messabstand zur Wand zu verringern sowie die Messauflösung zu erhöhen.

### Experimentelle Methode

Die Ermittlung des Bodenprofils im Wasserkanal wurde bereits in Rückborn et al. 2015 beschrieben. Das so vermessene Profil wurde im 3D-Druckverfahren reproduziert. Die Geschwindigkeitsmessung im Windkanal wurde mittels 2D-LDA-Verfahren durchgeführt. Durch eine Drehung der Sonde um  $90^\circ$  und einer zusätzlichen Winkelverschiebung konnten alle drei Geschwindigkeitskomponenten aufgenommen werden. Der so realisierte Messaufbau ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Reynoldszahl dieser Konfiguration liegt bei  $1,5 \cdot 10^5$  und ist auf den Zylinderdurchmesser  $D$  bezogen. Die verwendeten Seedingpartikel bei den Windkanalmessungen bestehen aus einem Wasser-Glyzerin-Gemisch, welches mittels Ultraschall zerstäubt wurde. Der Messbereich befindet sich in der  $x$ - $z$ -Ebene bei  $y/D = 0$  im Bereich des entstandenen Kolkgrabens, der sich vor dem Zylinder befindet. Da die erstellte Bodenplatte opak ist, gestaltet sich die Messung der Geschwindigkeit in Bodennähe als sehr schwierig. Als weitere Erschwernis kommt die schlechte Zugänglichkeit im Kolkloch hinzu. So ist eine Messung im flachen Winkel, um Reflexionen zu minimieren, nicht möglich. Eine Übersteuerung des Photomultipliers stellt hier die größte Gefahr dar. Durch eine Verringerung der Hochspannung des Photomultipliers auf 650 V konnte der Messabstand zur Wand auf 3 mm reduziert werden. Die Datenrate an der Wand lag bei etwa 5 Hz. Eine weitere Absenkung der Hochspannung war nicht möglich. Um die Messdauer pro Punkt auf ein ausreichendes Minimum zu reduzieren, wurden in einer Messung im turbulenten Zentrum des Hufeisenwirbels 10 000 Datenbursts des LDA's aufgenommen. So konnte mit hoher statistischer Wahrscheinlichkeit der korrekte Mittelwert ermittelt werden. Abbildung 2 zeigt die prozentuale Abweichung des gleitenden Mittelwertes vom genau bestimmten Mittelwert. Hier zeigt sich, dass bereits eine Messung von 200 Bursts ausreicht, um eine Statistikabweichung von unter 5 % zu erreichen. So wurden immer mindestens 200 Bursts pro Messpunkt aufgenommen. Wenn die Datenrate es zuließ, wurden auch bis zu 300 Bursts gemessen. Die Gesamtanzahl der einzelnen Messpunkte liegt bei 791. Weiterhin wurde kurz hinter der Anströmkannte, bei  $x/D = -10$ , das Geschwindigkeitsprofil entlang der  $z$ -Achse aufgenommen. Geschwindigkeitsabweichungen, die durch die Versperrung der Profilplatte entstehen, können so erfasst werden. So kann die Eingangsrandbedingung für die numerische Simulation verbessert werden. Das gemessene Profil ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Geschwindigkeit in Wandnähe ist teilweise um bis zu 9 % größer als die Kanal-Anströmgeschwindigkeit  $U_\infty$ .

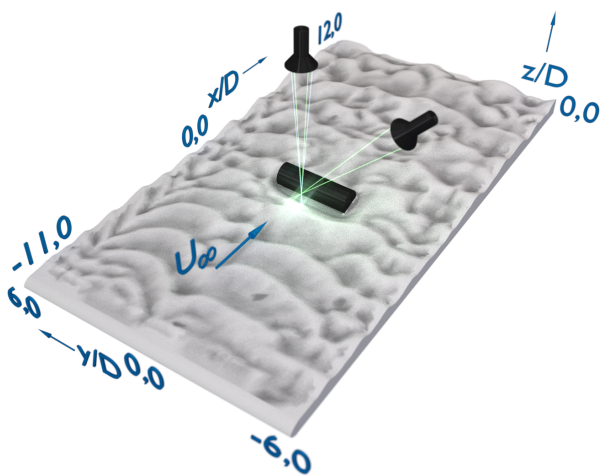


Abb. 1: Experimenteller Aufbau

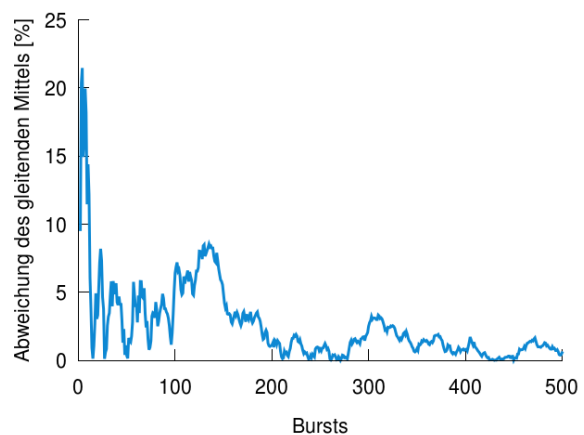


Abb. 2: Abweichung des gleitenden Mittels vom statistisch gesicherten Mittelwert

## Numerische Methode

Die hier verwendete numerische Methode ist ebenfalls in Rückborn et al. 2015 ausführlich beschrieben. Die Domain der Simulation wird in Abbildung 4 dargestellt. Die Simulation wird mit einer DES durchgeführt. Dies ist eine Hybridmethode aus RANS und LES (Fröhlich 2006). Die Reynoldszahl liegt, wie beim Experiment, ebenfalls bei  $1,5 \cdot 10^5$ . Im Gegensatz zum Experiment und der vorherigen Arbeit wird die Anströmkannte nicht mehr simuliert. Stattdessen wird das im Experiment ermittelte Geschwindigkeitsprofil kurz hinter der Anströmkannte als Einlassrandbedingung verwendet. Für die weiteren Analysen der numerischen Daten wurde die Bodenfracht-Sedimenttransportrate  $\vec{q}_b$  bestimmt. Diese gibt Aufschluss über die Richtung und Intensität des Sedimenttransports durch Bodenfracht. Die Transportrate lässt sich nach Engelund und Fredsøe (1976) wie folgt bestimmen:

$$\vec{q}_b = \begin{cases} \sqrt{R \cdot g \cdot d_{50}} \cdot d_{50} \cdot 18,74 (\theta - \theta_{cr}) \left[ \sqrt{\theta} - 0,7\sqrt{\theta_{cr}} \right] \frac{\vec{\tau}_w}{|\vec{\tau}_w|} & \text{für } \theta > \theta_{cr} \\ \vec{0} & \text{für } \theta \leq \theta_{cr} \end{cases} \quad (1)$$

$$\text{mit } R = \frac{\rho_s}{\rho_f} - 1 \quad (2)$$

Hier gehen neben der der Schwerebeschleunigung  $g$  noch die mittleren Korngröße  $d_{50}$ , die Sediment- und Fluidichte  $\rho_s$  und  $\rho_f$  sowie der nach Shields benannte Shieldsparameter  $\theta$  ein (Shields, 1936).

$$\theta = \frac{|\vec{\tau}_w|}{\rho_f \cdot g \cdot R \cdot d_{50}} \quad (3)$$

Für diesen wird wiederum die Wandschubspannung am Boden benötigt. Der Wandschubspannungsvektor definiert auch die Richtung der Sedimenttransportrate. Sobald  $\theta$  den kritischen Shieldsparameter  $\theta_{cr0}$  überschreitet, kommt es zum Sedimenttransport. Der kritische Shieldsparameter  $\theta_{cr0}$  ist wiederum von der Kornreynoldszahl abhängig und kann nach Van Rijn (1984) wie folgt approximiert werden:

$$\theta_{cr0} = \begin{cases} 0,24 \cdot D_*^{-1} & D_* \leq 4 \\ 0,14 \cdot D_*^{-0,64} & 4 < D_* \leq 10 \\ 0,04 \cdot D_*^{-0,10} & 10 < D_* \leq 20 \\ 0,013 \cdot D_*^{0,29} & 20 < D_* \leq 150 \\ 0,055 & D_* > 150 \end{cases} \quad (4)$$

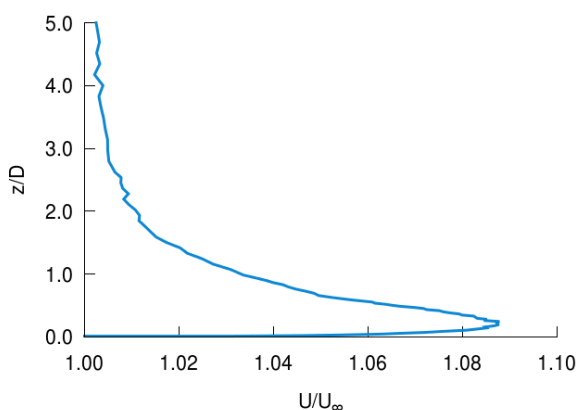


Abb. 3: Geschwindigkeitsprofil am Einlass

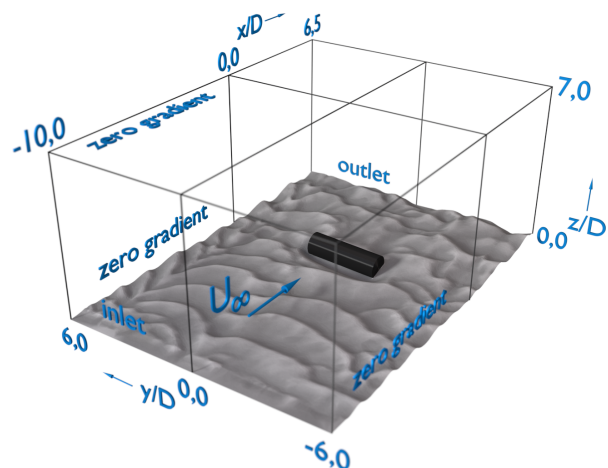


Abb. 4: Domain der numerischen Simulation

$$D_* = d_{50} \cdot \left( \frac{R \cdot g}{\nu^2} \right)^{1/3} \quad (5)$$

Mit  $D_*$  als dimensionslosen Korndurchmesser.  $\theta_{cr0}$  hat allerdings nur für einen ebenen Boden Gültigkeit. Der kritische Shieldsparameter kann jedoch angepasst werden und gilt dann auch an Gefällen (Engelund & Fredsøe, 1976)

$$\theta_{cr} = \theta_{cr0} \left( \cos \beta \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \phi \tan^2 \beta}{\mu_s^2}} - \frac{\cos \phi \sin \beta}{\mu_s} \right) \quad (6)$$

Hierbei sind die Hangneigung  $\beta$ , die Richtung der Strömung  $\phi$  relativ zur Richtung der Hangneigung sowie die Haftreibung für Sand  $\mu_s$  (hier mit 0,63 angenommen) zu berücksichtigen.

## Ergebnisse

Die Abbildungen 5 und 6 zeigen die experimentellen und numerischen Ergebnisse im Vergleich. Dargestellt sind die Geschwindigkeitsvektoren in der Betrachtungsebene. Die Geschwindigkeitskomponente orthogonal zur Ebene ist durch die Farbkontur dargestellt. Anhand der Vektoren ist in beiden Bildern deutlich der Hufeisenwirbel zu erkennen. Das Zentrum des Wirbels ist bei der numerischen Simulation hangaufwärts versetzt. Die Gesamtverschiebung ist allerdings kleiner als  $1/8D$ . Auch der Rest der Vektoren zeigt eine gute Übereinstimmung. Besonders der Bereich im Kolkloch sowie die hangaufwärts gerichtete Strömung stimmen sehr gut überein. Diese starke Rückströmung ist Auslöser für einen intensiven Sedimenttransport aus dem Kolkloch heraus.

Unterschiede sind jedoch bei der Querkomponente zu erkennen. Im Experiment entsteht eine starke Querströmung im Wirbelzentrum sowie im Kolkloch. Diese beträgt dort bis zu 50 % der Anströmgeschwindigkeit. Diese hohe Querströmung führt an dieser Stelle ebenfalls zu einer hohen Sedimenttransportrate. In der numerischen Simulation ist die Querkomponente im Wirbelkern nicht derart stark ausgeprägt. Sie erreicht hier sogar ein lokales Minimum mit etwa 15 % der Anströmgeschwindigkeit. Die Querströmung im Kolkloch hingegen stimmt wieder gut mit den Ergebnissen aus dem Experiment überein.

Für die starke Querströmung gibt es mehrere Gründe. Zum einen ist der Zylinder aufgrund des Versandungsprozesses um etwa  $3^\circ$  um die  $x$ -Achse verkippt. Dies wurde auch in der Simulation berücksichtigt. Weiterhin ist das Kolkloch nicht symmetrisch und die Konturen der Rippelkämme stromaufwärts des Zylinder zeigen Ausbuchtungen. Dieser Zustand ist durch die natürliche Versandung entstanden und zeigt eine Momentaufnahme. Bei weiterer Rippelpropagation kann sich die Kraft und Richtung der Querströmung wieder ändern. Bemerkenswert ist der große Einfluss dieser geringen Abweichungen. Womöglich kann ein um die  $x$  oder  $z$ -Achse verdrehter Zylinder das experimentelle Ergebnis hinsichtlich der Querkomponente stark beeinflussen. Auch die Herstellung der 3D-gedruckten Platte ist gewissen Fertigungstoleranzen unterworfen. So ließen sich die Abweichungen zur numerischen Simulation erklären. Da nicht alle Ungenauigkeiten berücksichtigt werden können, ist eine völlige Übereinstimmung zwischen Experiment und Numerik nicht erreichbar.

Die guten Übereinstimmungen der Strömungsgeschwindigkeiten in Bodennähe lassen jedoch die Bestimmung der Bodenfracht-Sedimenttransportrate  $\vec{q}_b$  auf Basis der numerischen Daten zu. Abbildung 7 zeigt die aus den numerischen Daten ermittelte Bodenfracht-Transportrate  $\vec{q}_b$ . Wie zu erwarten war, gibt es im Kolkloch einen starken Sedimenttransport entgegen der Hauptströmungsrichtung. Aufgrund des Hufeisenwirbels wird stetig Sediment den Hang hinauf transportiert und sollte so im Laufe der Zeit die Hangneigung erhöhen. Bei  $y/D = 0$  ist im Kolkgraben weiterhin der erwartete intensive Sedimenttransport quer zur Hauptströmungsrichtung zu erkennen. Das Gebiet auf dem Rippelkamm vor dem Zylinder mit der hohen Bodenfrachttransportrate zeigt, dass die Rippel einer ständigen Dynamik unterliegen. Das dort abtransportierte

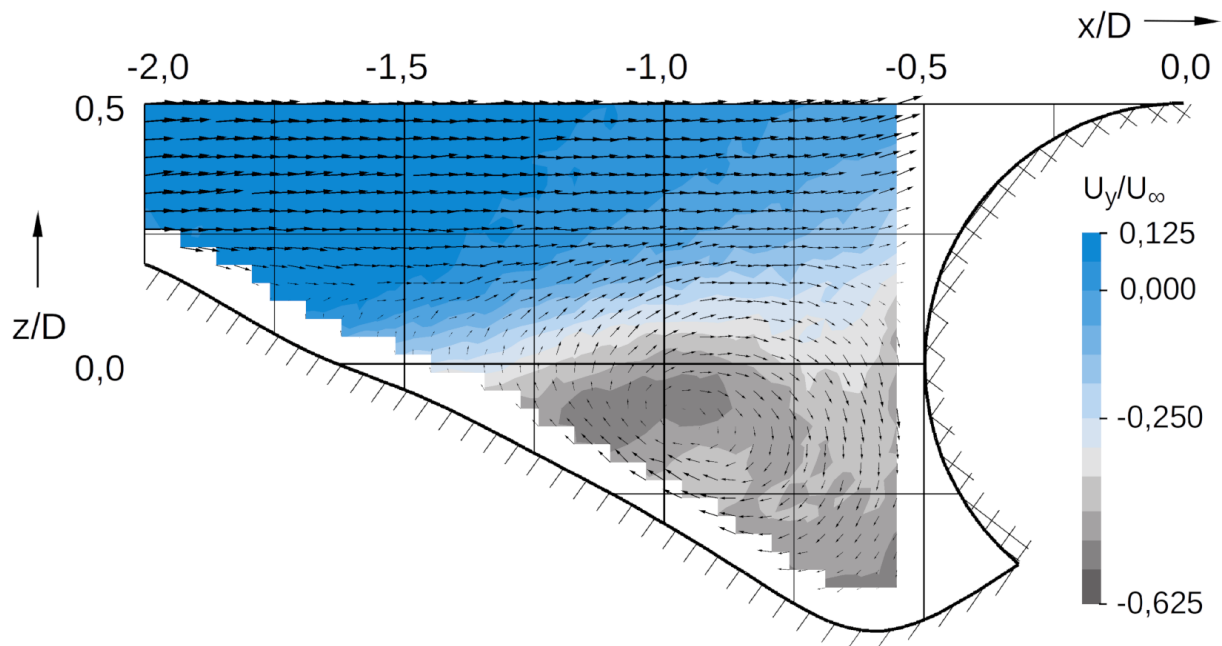


Abb. 5: Bereich des Hufeisenwirbels: Experiment

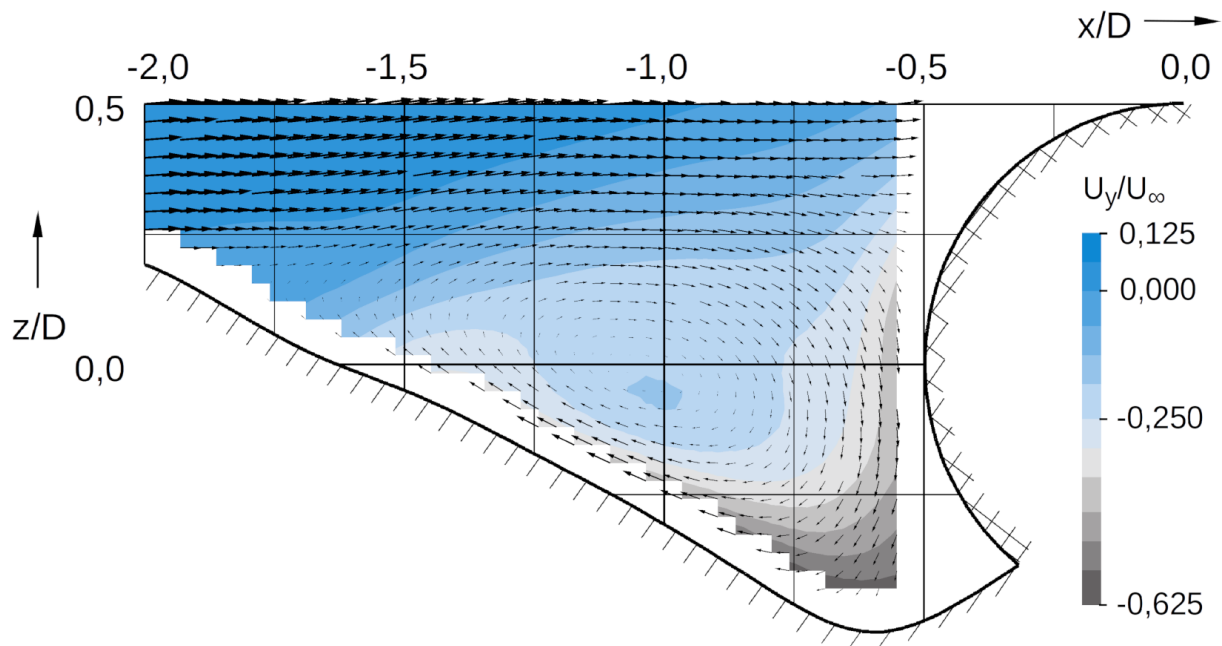


Abb. 6: Bereich des Hufeisenwirbels: Simulation

Sediment sollte sich in Strömungsrichtung am Hang ablagern und den Böschungswinkel weiter erhöhen. Eventuell geht das Sediment auch in eine Suspension über und lagert sich andernorts ab. Der so ermittelte Sedimenttransport deutet darauf hin, dass sich der Kolkgraben eigentlich weiter vertiefen sollte. Dies konnte im Wasserkanalexperiment jedoch nicht beobachtet werden. Es hat sich, bis auf die wandernden Rippel, ein quasi-stationärer Zustand eingestellt. Eine Betrachtung des Hangneigungswinkels  $\beta$  liefert einen Erklärungsansatz: der maximale Hangneigungswinkel für gewöhnliches Sediment liegt zwischen  $30^\circ$  bis  $42^\circ$ . Wird dieser überschritten, kommt es zu lawinenartigen Abrutschungen. Der Winkel ist abhängig von der Korngröße, Dichte, Kornform und weiteren Größen (Wu, 2007). Indem eine Sedimentprobe in einem mit Wasser gefüllten runden Glasbehälter gegebene wurde, konnte der kritische Winkel für das verwendete Sediment ermittelt werden. Der Glasbehälter wird hingelegt und solange gedreht, bis das



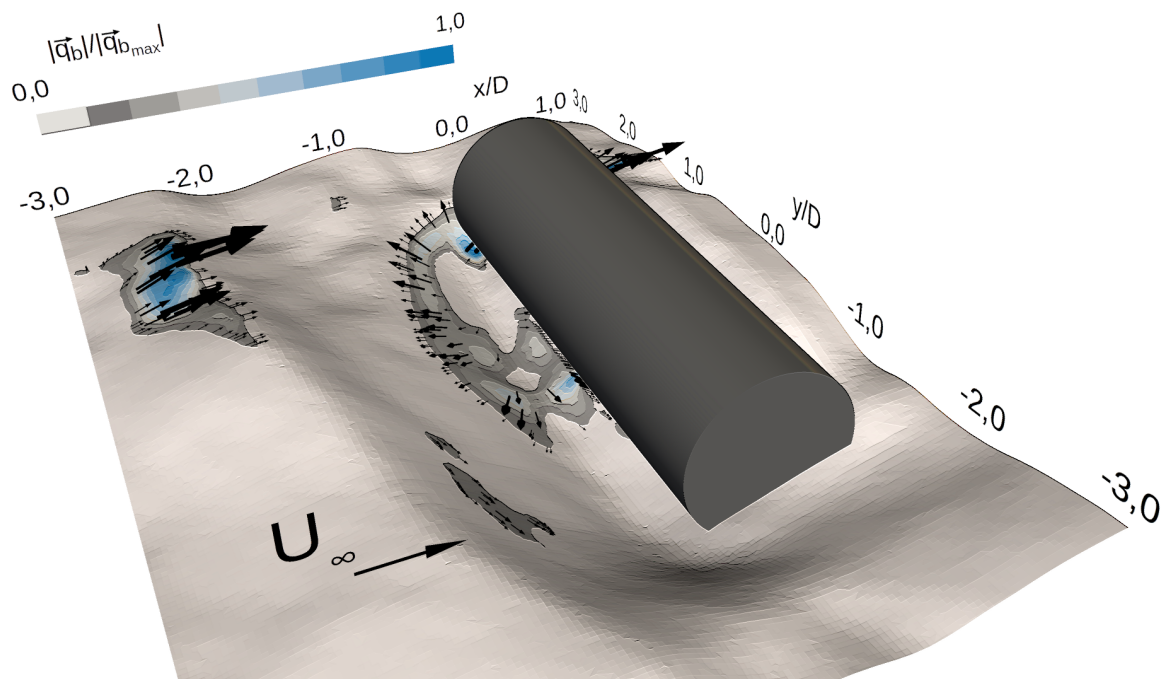


Abb. 7: Aus der Numerik bestimmte Bodenfrachttransportrate  $\bar{q}_b$  mit Richtungsvektoren

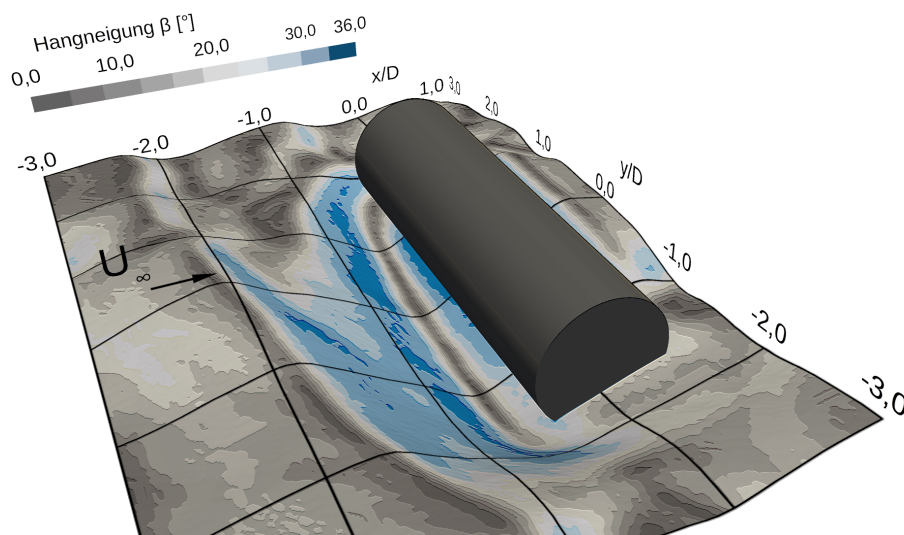


Abb. 8: Hangneigung  $\beta$



Abb. 9: Bestimmung der maximalen Hangneigung

Sediment gerade noch stabil bleibt (siehe Abbildung 9). Der hier ermittelte Winkel ergab etwa  $36^\circ$ . Wie in Abbildung 8 zu sehen, beträgt der Winkel am Hang des Kolklochs ebenfalls etwa  $36^\circ$ . So kommt es, dass das Sediment aus dem Kolkloch stetig den Hang hinauf transportiert wird, dort aber nicht stabil lagern kann und regelmäßig in des Kolkloch zurück rutscht. Durch die im Gleichgewicht stehenden Sedimenttransportraten für die Zufuhr und den Abtransport, bleibt eine konstante Kolk und Versandungstiefe erhalten.

### Zusammenfassung und Ausblick

Mittels 3-Komponenten LDA-Messungen konnte der schwer zugängliche Bereich des Hufeisenwirbels vor dem versandeten Zylinder analysiert werden. Die Ergebnisse sind deutlich detaillierter als die früher durchgeführte PIV-Untersuchung. So konnte der Messabstand zur Wand auf 3 mm reduziert werden. Neben dem nun deutlich sichtbaren Hufeisenwirbel konnte eine starke Querströmung nachgewiesen werden. Die durchgeführten numerischen Untersuchungen stim-

men weitestgehend mit dem Experiment überein. Unterschiede gibt es nur bei der Intensität der Querströmung. Diese wird im Bereich des Wirbelzentrums stark unterschätzt. Die Bestimmung der Bodenfrachttransportrate liefert Hinweise, um den Prozess der Versandung besser verstehen zu können.

In weiteren Simulationen ist der Einfluss einer Zylinderverdrehung zu untersuchen. Auch leichte Geometrievariationen der Rippel sind denkbar.

## **Literatur**

Engelund, F., Fredsøe, J., 1976: „A sediment transport model for straight alluvial channels“, Nordic Hydrology, pp. 7:293-306

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

Rückborn, T., Menzel, P., Leder, A., 2015: „Experimentelle und numerische Untersuchungen der Umströmung einer versandeten Struktur“, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 23. Fachtagung, pp. 44-1-47-7

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

Van Rijn, L. C., 1984: „Sediment transport, Part I: Bed load transport“, Journal of Engineering Mechanics, Volume 110, pp. 1431–1456

Wu, W., 2007: „Computational River Dynamics“, Taylor & Francis, London