

## Numerische und experimentelle Untersuchung zur Tracerausbreitung im Nachlauf eines Monopile-Fundaments

C. Schütt<sup>1</sup>, P. Menzel<sup>1</sup>, H. Morrison<sup>1</sup>, M. Manteuffel-Jensch<sup>2</sup>, S. Grundmann<sup>3</sup>, M. Paschen<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Lehrstuhl für Meerestechnik, Universität Rostock, Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock

<sup>2</sup> TenneT TSO GmbH, Eisenbahnlängsweg 2a, 31275 Lehrte

<sup>3</sup> Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Rostock, Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock

### Motivation

Zur Verringerung der Übertragungsverluste von elektrischer Energie aus küstenfernen Offshore-Windparks an Land werden so genannte Umrichterplattformen zwischengeschaltet. Diese wandeln den in Windturbinen induzierten Drehstrom in Gleichstrom um. An Land erfolgt die Rückwandlung. Die bei diesem Prozess in der Offshore-Umspannplattform entstehende thermische Energie (bis zu 18 MW) wird über installierte Kühlsysteme in das Meerwasser an die Umwelt abgegeben. Die dazu erforderliche Wasserentnahme aus dem Meer erfolgt unterhalb der Plattform durch Tauchpumpen.

Gründungsstrukturen derartiger Offshore-Konstruktionen können die durch Wellen und Strömung bestimmte Kinematik des Meerwassers messbar beeinflussen. Erhöhte Sohlenschubspannungen nahe den Gründungsstrukturen können zur Erosion von Sedimentpartikeln führen. Es ist bekannt, dass diese in bodenferne Regionen transportiert werden und dabei in den Ansaugbereich der Kühlwasserpumpen gelangen können. Eine erhöhte Partikelkonzentration im Seekühlwasser führt zu einer erhöhten Last in der automatischen Rückspülfilteranlage. Sofern die Last den Auslegungspunkt der Filteranlagen übersteigen, kommt es zum Ausfall des gesamten Netzanbindungssystems und somit zu einem Fehlbetrag von bis zu 900 MW. Da die Auslegung der Filteranlagen auf Sedimentdaten beruhen, welche ohne Gründungsstrukturen ermittelt worden sind, ist es wichtig im Rahmen des Plattformdesigns potentielle Bereiche erhöhter Sedimentkonzentration mit Gründungsstruktur zu identifizieren. Hierfür benötigt es die Grundlagen und Verifikation eines Verfahrens zur Vorhersage des Sedimenttransports.

Um Aussagen über die Partikelverteilung im Nachlauf einer umströmten Struktur treffen zu können, werden Untersuchungen an einem vertikalen Zylinder durchgeführt. Anfangs sollen bekannte Strömungsstrukturen um einen Monopile auf Grundlage numerischer Simulationen mit der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) reproduziert werden. Nachfolgend wird die Ausbreitung auftriebsneutraler Tracer in diesem Strömungsfeld berechnet. Zur Verifizierung der Ergebnisse sollen PIV und LIF Untersuchungen im Wasserkanal durchgeführt werden. Durch den Vergleich der numerischen und experimentellen Resultate, sollen die Bewegung der Partikel sowie die räumliche Konzentrationsverteilung betrachtet werden.

### Umströmung von Monopiles

Die Strömung um einen Monopile wird durch zwei Wirbelsysteme bestimmt, den Hufeisenwirbel vor dem Objekt und der Kármánschen Wirbelstraße in dessen Nachlauf. Nach Roulund et al. (2005) und Unger und Hager (2006) entwickelt sich der Hufeisenwirbel aus einer abwärts gerichteten Strömung direkt vor dem Objekt, welche aus der Verzögerung der Anströmung resultiert. In Bodennähe entsteht eine horizontale Rückströmung, welche die Ablösung der Grenzschicht stromaufwärts zur Folge hat (Abbildung 1). Die Sohlenschubspannung wird nach

Unger und Hager (2006) direkt unter dem Hufeisenwirbel maximal, wodurch nach Shields (1936) in diesem Bereich Sedimentpartikel erodiert werden. In Pflieger (2011) wird dieser Kolkprozess in verschiedene Phasen unterteilt und detailliert beschrieben.

In Menzel et al. (2013) wird gezeigt, dass vor Objekten erodierte Sedimentpartikel mit der Strömung in dessen Nachlauf getragen werden. Hinter dem Objekt bildet sich ein, von der Geometrie und Strömung abhängiges, Rezirkulationsgebiet. Ferner wird deutlich, dass das Strömungsfeld in diesem Bereich den Weg der Partikel stark beeinflusst. Weiter kann der Nachlauf eines Monopiles nach Dargahi (1989) und Roulund et al. (2005) durch wechselseitig vom Objekt ablösende, gegenläufige Wirbel charakterisiert werden. Es ist somit zu erwarten, dass die Sedimentpartikel im Fluid dieser Kármánschen Wirbelstraße folgen. Weiter wurde in Dargahi (1989) festgestellt, dass sich Hufeisen- und Nachlaufwirbel kaum beeinflussen, wodurch beide unabhängig untersucht werden können.

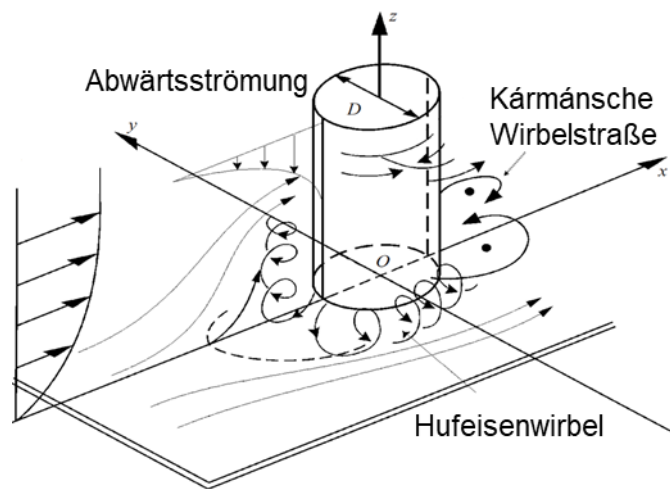


Abbildung 1 Wirbelsysteme im Umfeld eines Monopiles, in Anlehnung an Roulund et al. (2005)

### Numerische Simulation

Zur Untersuchung der Partikelverteilung im Umfeld eines Monopiles wurde dessen Umströmung numerisch simuliert. Oft werden solche Berechnungen durch das Lösen der Navier-Stokes-Gleichung mit einer geeigneten Simulationssoftware durchgeführt. Als Alternative hierzu gilt die Strömungssimulation mit der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM). Ihr liegt die Boltzmann-Gleichung aus der kinetischen Gastheorie zu Grunde.

Die Simulation mit der LBM ist ausführlich in z.B. Sukop und Thorne (2006), Morrison et al. (2016) und Morrison und Leder (2018) beschrieben. Es sei zu erwähnen, dass makroskopische Eigenschaften des Fluides aus der statistischen Verteilung der einzelnen mikroskopischen Teilchen abgeleitet werden können. In der LBM gibt eine Verteilungsfunktion die Anzahl der Fluidpartikel in einem definierten Orts- und Geschwindigkeitsraum an. Die zeitliche Änderung dieser Funktion wird über Boltzmann-Gleichung ausgedrückt, welche auf ein Gitter diskretisiert wird. In den durchgeführten Simulationen wurde ein dreidimensionales Gitter verwendet, bei dem pro Gitterpunkt insgesamt 27 Verteilungsfunktionen vorliegen, die jeweils einem Geschwindigkeitsvektor entsprechen (D3Q27). 26 dieser Geschwindigkeitsvektoren zeigen auf die jeweils direkten Nachbarn des Gitterpunktes. Zur Veranschaulichung ist in Abbildung 2 der vereinfachte Fall eines zweidimensionalen Gitters mit 8 Nachbarn (D2Q9) dargestellt.

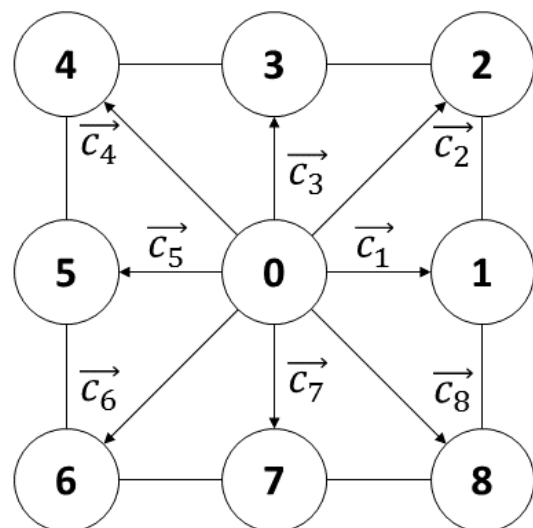


Abbildung 2 Darstellung D2Q9 Modell

Als essenzieller Bestandteil der Simulation gilt die Betrachtung der Kollisionen zwischen einzelnen Verteilungsfunktionen. Hierzu wird ein Kollisionsparameter verwendet. Vergleichbar mit

dem Reynolds-Spannungstensor stehen für die mathematische Behandlung des Kollisionsparameters verschiedene Modelle zur Verfügung. Für die durchgeführten Berechnungen wurde ein Kollisionsmodell nach Karlin et al. (2014) verwendet.

Um den Einfluss der Randbedingungen von Ein- und Auslass auf das Strömungsfeld im Nachlauf des Monopiles zu minimieren, wurde vor der Simulation die Auswirkung der Domaingröße untersucht. Zusätzlich wurden in den Voruntersuchungen verschiedene Gitterauflösungen untersucht. Schlussendlich wurden zwei Simulationsdomains mit einer Länge von 40 Monopiledurchmessern ( $D$ ), einer Breite von  $6 D$  und einer Höhe von  $4 D$  berechnet (Vgl. Tabelle 1). Das Objekt befand sich in beiden Simulationen  $10 D$  vom Einlass entfernt und erstreckte sich über die gesamte Domainhöhe. Um einen Monopile in unendlicher Umgebung dazustellen, wurden für die Seitenflächen und die Deckfläche periodische Randbedingungen gewählt. Der Boden und die Mantelfläche des Monopiles wurden als reflektierende Wände durch die *no slip* Bedingung beschrieben, während für den Auslass der Druck vorgegeben wurde. Am Einlass wurde ein realitätsnahes Strömungsprofil vorgegeben, welches zuvor eigenständig berechnet wurde. Auf Grund der zu erwartenden Strömungsgeschwindigkeiten in den Validierungsexperimenten, wurde eine Reynoldszahl von 9000 gewählt.

Wie Tabelle 1 zu entnehmen ist, unterschieden sich die durchgeführten Simulationen durch die verwendeten Gitterauflösungen und Verfeinerungsstufen voneinander. Während bei der ersten Simulation eine kleinere Grundauflösung des Gitters gewählt wurde, konnte hier der Bereich um den Monopile feiner aufgelöst werden.

Tabelle 1 Simulationsparameter numerische Simulationen

Simulation	Rechengebiet			Auflösung Zellen / $D$	Verfeinerung
	$x/D$	$y/D$	$z/D$		
1	40	6	4	20	2-stufig
2	40	6	4	30	1-stufig

Der Transport auftriebsneutraler Partikel wurde mit dem simulierten zeitlichen Geschwindigkeitsfeld in der Visualisierungssoftware *ParaView* modelliert. Hierzu wurde der Filter *Particle Tracer* verwendet. Als Quelle der Partikel wurde eine Kugel mit einem Durchmesser von  $0,15 D$  definiert. Um den Transport erodierter Sedimentteilchen im Bereich der Auskolkung zu simulieren, wurde der Mittelpunkt der Kugel jeweils  $0,15 D$  vor dem Zylinder und über dem Boden positioniert.

### Experimentelle Untersuchung

Zur Verifizierung der numerisch berechneten Ergebnisse wurden experimentelle Untersuchungen im von Menzel (2010) beschriebenen Schichtenströmungskanal des Lehrstuhls für Strömungsmechanik an der Universität Rostock, durchgeführt. Untersucht wurde ein vertikaler Zylinder mit einem Durchmesser von  $0,05 \text{ m}$ . Bei einem Wasserstand von  $0,47 \text{ m}$  und einer Kanalbreite von  $0,80 \text{ m}$  betrug die mittlere Anströmgeschwindigkeit während der Experimente  $0,08 \text{ ms}^{-1}$ . Es resultiert eine Reynoldszahl von 4220.

Mit einem in Menzel (2010) erläuterten Nd:YAG Laser wurde ein Lichtschnitt in der  $x$ - $z$ -Ebene, mittig hinter dem Monopile erzeugt. Mit der Particle Image Velocimetry (PIV) konnte das Geschwindigkeitsfeld im Nachlauf des Objekts aufgenommen werden. Bei der PIV werden im Fluid befindliche Streuteilchen mit einem Laser beleuchtet. Durch die Aufnahme von zeitlich versetzten Doppelbildern kann mittels einer Kreuzkorrelation die durchschnittliche Bewegung der Partikel bestimmt werden.

Vor dem Monopile erodierte Sedimentpartikel werden mit der Strömung in den Nachlauf des umströmten Objekts getragen. Dieser Prozess wurde in den Experimenten durch die Zugabe

des fluoreszierenden Stoffes Rhodamin 6G simuliert. Ein am Staupunkt des Zylinders installiertes Metallröhrchen diente hierbei zur Freisetzung des Stoffes in Bodennähe. Die Ausbreitung im Nachlauf konnte anschließend über die laserinduzierte Fluoreszenz (LIF), parallel zu den PIV-Messungen, qualitativ beobachtet werden. Hierfür wird eine geeignete Substanz durch die Beleuchtung mit einem Laserlichtschnitt zum fluoreszieren angeregt. Die relative Konzentration eines fluoreszierenden Stoffes im Messbereich kann aus der Helligkeit der Fluoreszenz abgeleitet werden. In dem beschriebenen Anwendungsfall gibt die Beobachtung des Messbereichs Aufschluss über die Strömung sowie die daraus resultierende konvektive und diffusive Bewegung von auftriebsneutralen Partikeln und Stoffen. Folglich ist ein direkter Vergleich von numerischen und experimentellen Ergebnissen möglich.

Der Messbereich des PIV/LIF Systems maß in den durchgeführten Experimenten 0,215 m in x-Richtung und 0,120 m in z-Richtung, was einem Bereich von  $4,3 D \times 2,4 D$  entspricht. Zur Validierung der Simulationsergebnisse wurden Messungen in den in Tabelle 2 aufgelisteten Messbereichen durchgeführt. Durch eine Beeinträchtigung der Einsehbarkeit in die Messstrecke blieb zwischen dem zweiten und dritten Messbereich ein Abschnitt von ca.  $2 D$  Länge unbeobachtet. Weiter wurden Messungen im selben Messbereich mit einer vertikalen Überschneidung von  $0,6 D$ , also 25%, aufgenommen.

Tabelle 2 Messbereiche der experimentellen Untersuchungen

Messbereich	Messung	Bildbereich	
		x / D	z / D
1	01	-0,3 bis 4,0	0,0 bis 2,4
	02	-0,3 bis 4,0	1,8 bis 4,2
2	03	4,0 bis 8,2	0,0 bis 2,4
	04	4,0 bis 8,3	1,8 bis 4,2
3	05	10,2 bis 14,5	0,0 bis 2,4
	06	10,2 bis 14,5	1,8 bis 4,2

In verschiedenen Messungen wurde ein Bereich zwischen 0 und  $14,5 D$  hinter dem Monopile auf einer Höhe zwischen 0 bis  $4 D$  untersucht. Die Aufnahme und Auswertung der Messdaten wurden über das Programm *FlowManager* der Firma *Dantec Dynamics* durchgeführt. Hierzu wurden je Messung 1024 PIV und LIF Messbilder mit einer Abtastrate von 15 Hz aufgenommen.

## Ergebnisse

Ein essenzieller Bestandteil der Fragestellung befasste sich mit der räumlichen Auflösung der Partikelverteilung im Nachlauf eines Monopiles. Die Untersuchung der durchschnittlichen Partikelkonzentration war hierbei jedoch nicht zielführend, da vor allem Partikelcluster zu einer erhöhten Belastung der Filteranlage des Kühlsystems führen. Folglich wurde in der Auswertung der numerischen und experimentellen Daten die maximale Konzentration betrachtet.

Als maßgeblicher Indikator für die Konzentration von fluoreszierenden Stoffen im Nachlauf des Monopiles kann die Pixelhelligkeit der LIF-Aufnahmen verwendet werden. Dabei weist eine starke Fluoreszenz auf eine hohe Konzentration hin. Durch die Auswertung der LIF-Messungen konnten die maximal aufgetretenen Pixelhelligkeiten für jeden Messbereich räumlich ermittelt werden. In Abbildung 3 sind die Resultate der einzelnen Messungen für den gesamten untersuchten Nachlauf zusammengefasst. Betrachtet man den Übergang von Messung 1 zu Messung 3 ist zu erkennen, dass die Aufnahmebereiche nicht homogen durch den Laserlichtschnitt ausgeleuchtet werden konnten. Besonders an den Aufnahmerändern stromauf- und stromabwärts wurde durch eine zu geringe Lichtintensität der fluoreszierende Stoff

lediglich schwach angeregt. Bei der visuellen Auswertung der Experimente werden folglich nur die mittleren Einzelbildbereiche beachtet.

Aus den in Abbildung 3 dargestellten experimentellen Ergebnissen werden verschiedene Verhaltensweisen von auftriebsneutralen Streupartikeln deutlich. Zuerst lässt sich feststellen, dass die Konzentration des fluoreszierenden Stoffes nahe hinter dem Zylinder maximal ist. Mit anwachsender Entfernung zum Objekt nimmt die Konzentration stetig ab. Dies lässt sich zum einen mit dem konvektiven Stofftransport in Strömungsrichtung erklären. Zum anderen bewirkt die Diffusion ein Konzentrationsausgleich in alle Raumrichtungen. Des Weiteren werden Teile der Substanz durch die Wirbel der Kármánschen Wirbelstraße seitlich aus der x-z-Messebene herausgetragen.

Weiter ist die Konzentrationsverteilung direkt hinter dem umströmten Pfahl auffällig. Die Quelle des fluoreszierenden Stoffes befand sich vor dem Zylinder in direkter Bodennähe. Trotz dessen sind im objektnahen Nachlauf erhöhte Stoffkonzentrationen auf bis zu  $2 D$  Höhe über dem Boden zu registrieren. Durch die rezirkulierende Strömung hinter einem Objekt, wird ein Teil des Stoffes in diesem Bereich gehalten. Verwirbelungen in direkter Objektnähe sorgen anschließend für einen erhöhten vertikalen Stofftransport.

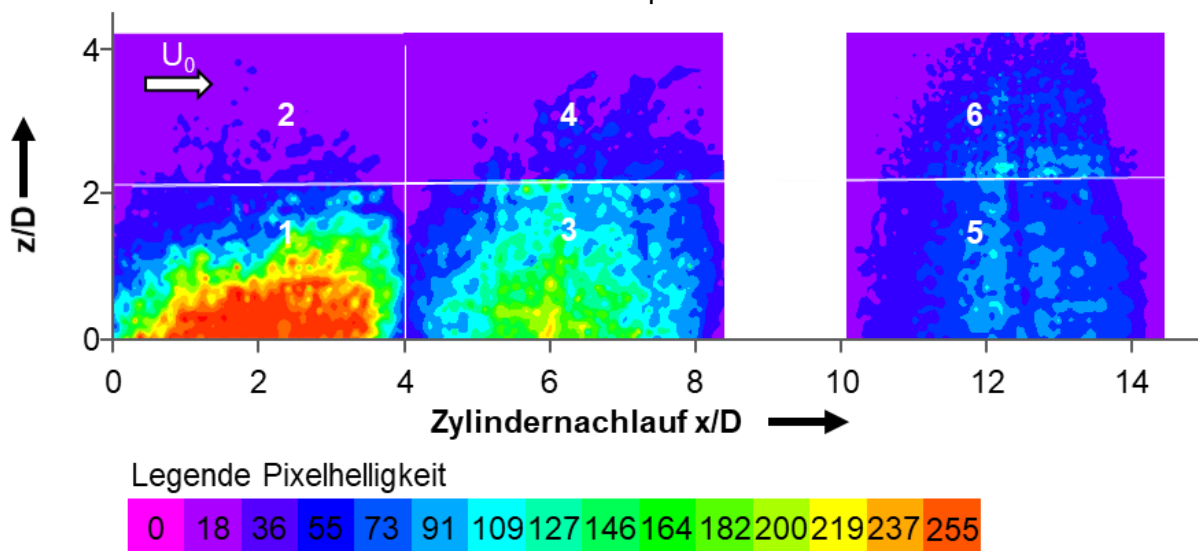


Abbildung 3 Zusammenfassung der maximale Fluoreszenz aller Messbereiche

Zuletzt ist eine Zunahme der vertikalen Stoffausbreitung mit größer werdender Entfernung zum Monopile zu erkennen. Während in den Messbereichen zwischen 0 und  $8,3 D$  nur geringe Stoffkonzentrationen oberhalb von  $2,5 D$  über dem Boden aufgenommen werden konnten, wurden im Messbereich zwischen  $10,2$  und  $14,5 D$  ausgeprägte Partikelwolken notiert. Dies weist auf einen nicht vernachlässigbaren vertikalen Transport des eingesetzten fluoreszierenden Stoffes hin. Der direkte Vergleich mit den Resultaten der numerischen Simulation wird zeigen ob es sich hierbei um einen physikalischen Effekt, oder einen Fehler in den Messungen handelt.

Nachfolgend soll die Anwendbarkeit des vorgestellten simulierten Partikeltransportes mit der LBM und *ParaView* überprüft werden. Für Abbildung 4 wurde der Nachlauf der ersten Simulation in Kontrollvolumen unterteilt. Anschließend wurde der zeitliche Verlauf aller Partikel ausgewertet. Als Resultat konnte die maximal auftretende Partikelkonzentration jedes Kontrollvolumens räumlich dargestellt werden. Die Konzentrationswerte der einzelnen Kontrollvolumina wurden abschließend auf die maximal auftretende Konzentration normiert.

Der Vergleich mit den zuvor beschriebenen experimentellen Ergebnissen aus Abbildung 3 macht eine große Ähnlichkeit zwischen den beiden Untersuchungsarten deutlich. Wie schon in den Experimenten ist die maximale Partikelkonzentration nahe des Zylinders am Boden zu finden. Jedoch wird die bereits beschriebene inhomogene Ausleuchtung der Messbereiche in

Abbildung 3 deutlich. Während der Experimente konnte die maximale Pixelhelligkeit in einem Abstand von ca.  $1 D$  hinter dem Monopile gemessen werden. Hingegen ist bei den simulierten Ergebnissen das stärkste Partikelvorkommen direkt hinter dem Monopile zu erkennen. Vergleicht man die objektnahe vertikale Ausbreitung der auftriebsneutralen Streuteilchen in Abbildung 4 mit den zuvor erläuterten experimentellen Daten, lässt sich eine große Ähnlichkeit feststellen. Bei beiden Untersuchungsarten erreichten die Tracer eine Höhe von ca.  $2 D$ . Dies bestätigt den zuvor angenommenen Einfluss des Rezirkulationsgebietes auf die objektnahe Partikelverteilung.

Als weitere Merkmale der experimentellen Untersuchungen galten bei zunehmender Entfernung zum Zylinder eine abnehmende Partikelkonzentration sowie die ansteigende vertikale Ausbreitung. Beide Effekte konnten nach Abbildung 4 erfolgreich mit der Kombination aus LBM und *ParaView* reproduziert werden.

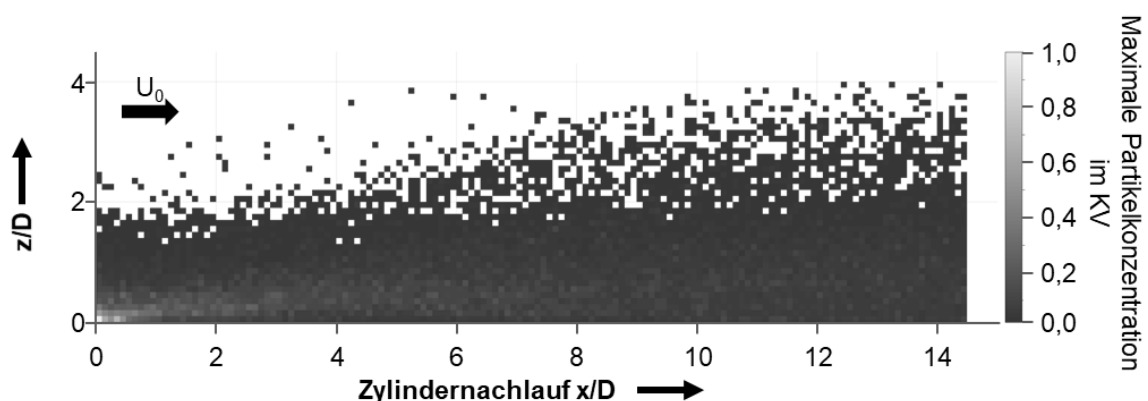


Abbildung 4 Maximale Partikelverteilung im Nachlauf des Monopiles, Simulationsergebnis Simulation 1

In Abbildung 5 ist die maximale Partikelkonzentrationsverteilung aus den Simulationsergebnissen der zweiten Simulation dargestellt. Der Vergleich mit Abbildung 4 stellt jedoch keine signifikanten Unterschiede heraus. Lediglich bei der vertikalen Partikelausbreitung im Bereich von  $6$  bis  $10 D$  lassen sich leichte Unterschiede erkennen. So konnten in der ersten Simulation einzelne Partikel in Höhen von  $3$  bis  $3,5 D$  gelangen, während bei der zweiten Simulation lediglich  $2,5 D$  erreicht wurden. Diese Abweichungen lassen sich jedoch mit der turbulenten Strömung im gesamten Nachlauf erklären.

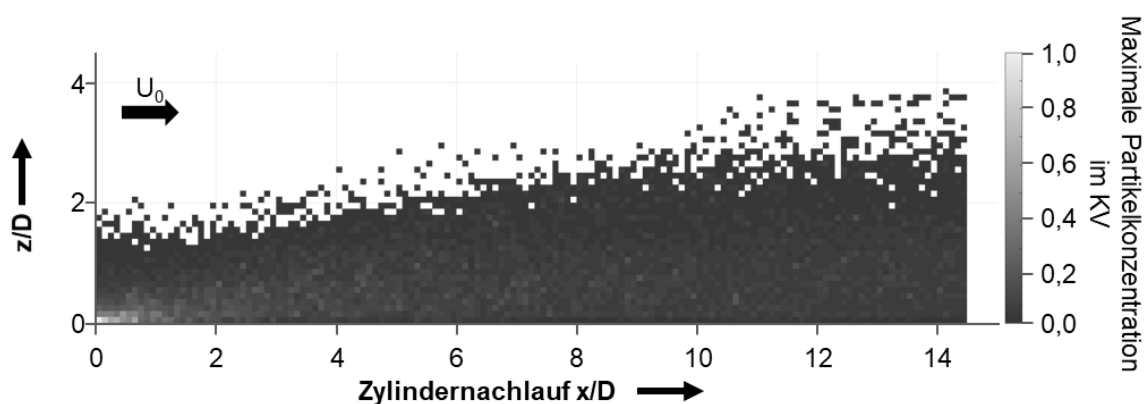


Abbildung 5 Maximale Partikelverteilung im Nachlauf des Monopiles, Simulationsergebnis Simulation 2

Der Partikeltransport in bodenferne Bereiche wird durch die vertikale Geschwindigkeitskomponente der Teilchen bestimmt. Hierzu sind in Abbildung 6 die über die Simulationsdauer ma-

ximal auftretenden vertikalen Partikelgeschwindigkeiten abgebildet. Hierbei wurden die vertikalen Geschwindigkeiten mit der Anströmgeschwindigkeit  $U_0$  normiert. Zur besseren Anschaulichkeit wurden Bewegungen unter  $0,2 U_0$  herausgefiltert.

Es ist zu erkennen, dass besonders im Bereich bis  $5 D$  hinter dem Monopile vertikale Geschwindigkeiten von ca.  $1,0 U_0$  auftreten können. Die Ursache hierfür kann die bereits erwähnte Rezirkulation und Verwirbelung direkt hinter dem Monopile sein. Weiter ist zu erkennen, dass die maximalen vertikalen Geschwindigkeiten mit zunehmender Entfernung zum Objekt abnehmen.

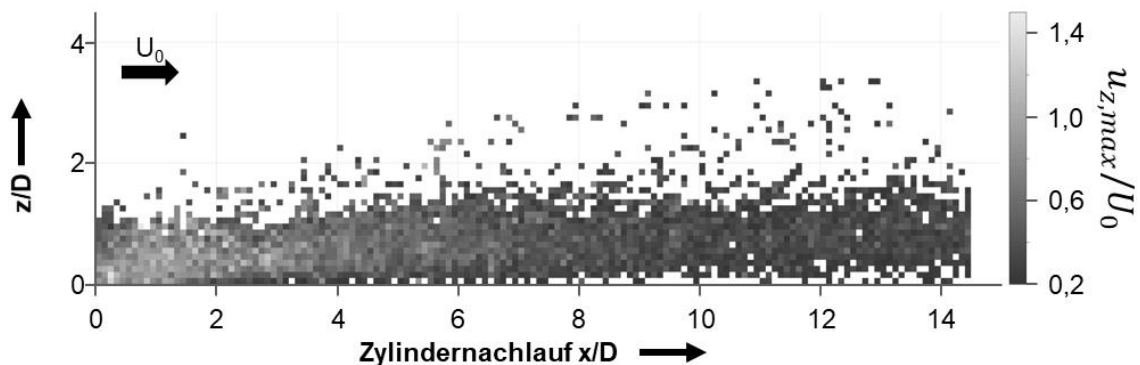


Abbildung 6 Maximale vertikale Partikelbewegung, normiert auf die Anströmgeschwindigkeit, (nur Geschwindigkeiten über  $0,2 U_0$ )

Abschließend sind in nachfolgender Abbildung 7 die über den Simulationszeitraum gemittelten vertikalen Geschwindigkeiten dargestellt. Wie bereits zuvor, wurden lediglich Kontrollvolumina mit Geschwindigkeiten über  $0,2 U_0$  verwendet. Es wird ersichtlich, dass vor allem Partikel im oberen Teil der Partikelverteilung signifikante vertikale Geschwindigkeiten aufweisen. In der Simulation wurde die Kinematik auftriebsneutraler Partikel betrachtet, weshalb keine diffusiven Prozesse eines im Fluid gelösten Farbstoffes abgebildet werden konnten. Die in den Experimenten beobachtete vertikale Ausbreitung des fluoreszierenden Stoffes resultiert somit neben der Diffusion auch aus dem strömungsbedingten Transport.

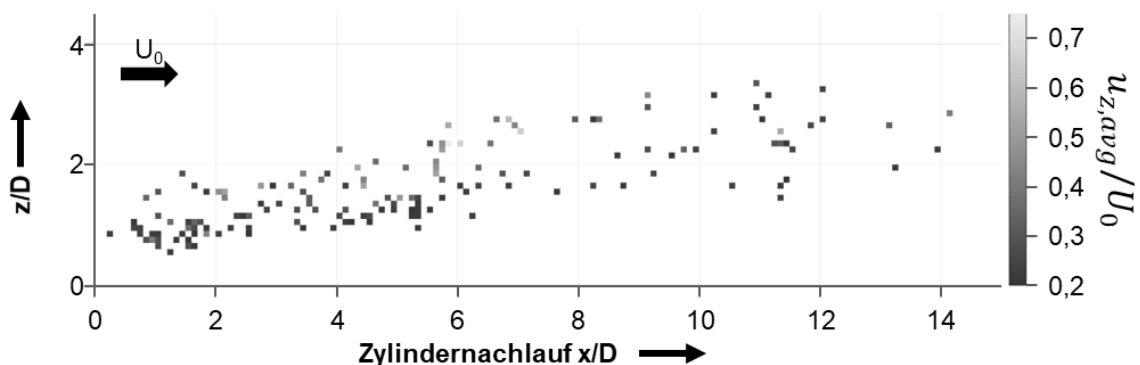


Abbildung 7 Durchschnittliche vertikale Partikelbewegung, normiert auf die Anströmgeschwindigkeit (nur Geschwindigkeiten über  $0,2 U_0$ )

### Zusammenfassung und Ausblick

Mit numerischen und experimentellen Untersuchungen konnte der Transport auftriebsneutraler Partikel und Stoffe im Nachlauf eines umströmten Monopiles untersucht werden. Neben dem Stofftransport in Anströmrichtung weit vor dem Monopile, konnten Partikel in einem großen Bereich hinter dem Objekt nachgewiesen werden. Besonders der Transport von Teilchen in bodenferne Bereiche war hierbei von Interesse.

Der Vergleich der Simulationsdaten mit den experimentellen Ergebnissen konnte sowohl den berechneten Sedimenttransport als auch das numerisch ermittelte Geschwindigkeitsfeld verifizieren. Die Lattice-Boltzmann-Methode in Kombination mit *ParaView* bietet somit ein geeignetes Simulationsverfahren zur Klärung von Fragestellungen zum Sedimenttransport hinter umströmten Strukturen.

Von zukünftigem Interesse ist die Simulation des Sedimenttransportes mit der LBM, wie beispielsweise in Morrison und Leder (2018) beschrieben. Durch die Weiterentwicklung des Simulationscodes wäre es somit möglich, den Meeresboden in der Umgebung des umströmten Objektes zu simulieren, wodurch ein realitätsnaher Versandungsprozess nachgebildet werden könnte.

Eine wissenschaftlich wie auch technisch lohnenswerte Aufgabe bestände in der Analyse des Sedimenttransportes in der Nähe konstruktiv komplexerer Pfahlstrukturen, wie sie zum Beispiel in Gestalt von Jacket-Plattformen bekannt sind. So wäre es unter anderem möglich, genauere Aussagen über den Sedimenttransport in unmittelbarer Nähe des Plattformfundamentes, sowie über die Sedimentverteilung im Ansaugbereich der Kühlwasserpumpen zu treffen

### Literaturverzeichnis

Dargahi, B. (1989): The turbulent flow field around a circular cylinder. In: *Experiments in Fluids* 8 (1-2), S. 1–12. DOI: 10.1007/BF00203058.

Karlin, I. V.; Bösch, F.; Chikatamarla, S. S. (2014): Gibbs' principle for the lattice-kinetic theory of fluid dynamics. In: *Phys. Rev. E* 90 (3). DOI: 10.1103/PhysRevE.90.031302.

Menzel, Peter (2010): Turbulente Mischungsvorgänge im Nachlauf einer dichtegeschichteten Zylinderumströmung. Zugl.: Rostock, Univ., Diss., 2009. 1. Aufl. Kühlungsborn: Menzel-Verl.

Menzel, Peter; Ruckborn, Tom; Leder, Alfred (2013): Flow and scour around cylindrical objects in laboratory experiments. In: 2013 MTS/IEEE OCEANS - Bergen. 2013 MTS/IEEE OCEANS. Bergen, 10.06.2013 - 14.06.2013: IEEE, S. 1–8.

Morrison, Helen E.; Brede, Martin; Dehnhardt, Guido; Leder, Alfred (2016): Simulating the flow and trail following capabilities of harbour seal vibrissae with the Lattice Boltzmann Method. In: *Journal of Computational Science* 17, S. 394–402. DOI: 10.1016/j.jocs.2016.04.004.

Morrison, Helen E.; Leder, Alfred (2018): Sediment transport in turbulent flows with the lattice Boltzmann method. In: *Computers & Fluids*. DOI: 10.1016/j.compfluid.2018.04.015.

Pfleger, Florian E. J. (2011): Experimentelle Untersuchung der Auskolkung um einen zylindrischen Brückenpfeiler. Dissertation. Technische Universität München, München. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen.

Roulund, Andreas; Sumer, B. Mutlu; Fredsøe, Jørgen; Michelsen, Jess (2005): Numerical and experimental investigation of flow and scour around a circular pile. In: *J. Fluid Mech.* 534, S. 351–401. DOI: 10.1017/S0022112005004507.

Shields, A. (1936): Anwendung der Ähnlichkeitsmechanik und der Turbulenzforschung auf die Geschiebebewegung; Eigenverl. der Preußischen Versuchsanst. für Wasserbau und Schiff (Preussische Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau Berlin: Mitteilungen der Preußischen Versuchsanstalt für Wasserbau und Schiffbau, Berlin). Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=sJviG-wAACAAJ>.

Sukop, Michael C.; Thorne, Daniel T. (2006): Lattice Boltzmann modeling. An introduction for geoscientists and engineers. Berlin: Springer.

Unger, Jens; Hager, Willi H. (2006): Down-flow and horseshoe vortex characteristics of sediment embedded bridge piers. In: *Exp Fluids* 42 (1), S. 1–19. DOI: 10.1007/s00348-006-0209-7.