

Numerische Simulation der Umströmung eines auf Sediment aufliegenden stumpfen Körpers

Numerical simulation of the flow around a body lying on a sediment bed

T. Rückborn, P. Menzel, A. Leder

c/o Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik
Steinbeis-Transferzentrum für Strömungsmechanik
Albert-Einstein-Straße 2, 18059 Rostock

numerisch, RANS, OpenFOAM, Zylinder, Würfel, Quader, Platte, Sedimenttransport
numerical, RANS, OpenFOAM, cylinder, cube, rectangular, plate, sediment transport

Zusammenfassung

Die Wandschubspannung ist eine der entscheidenden Größen zur Bestimmung von Sediment-Transportvorgängen. Da die korrekte Darstellung der Umströmung eines lagernden Körpers auf einer Platte, einen direkten Einfluss auf die dort zu ermittelnde Wandschubspannung hat, ist es zunächst von Bedeutung, die numerische Simulation des sich einstellenden Strömungsfeldes bei der Umströmung zu validieren. In dieser Arbeit werden die im Umfeld verschiedener Objekte auftretenden Strömungsphänomene numerisch in OpenFOAM simuliert. Diese Objekte liegen zunächst auf einem ebenen Boden. Neben einem liegenden Zylinder werden auch ein Würfel und ein liegender Quader untersucht. Die Validierung erfolgt anhand von experimentellen Untersuchungen. Die grundlegenden Strömungsstrukturen können prinzipiell dargestellt werden.

Einleitung

Die Bedeutung von Versandungsvorgängen steigt mit zunehmender Bebauung der Meere durch den Menschen. Die Versandung hängt bei gegebenem Strömungsfeld im Wesentlichen von dem Korndurchmesser und der Dichte des Sediments ab. Neben einer gleichmäßigen Anströmung muss auch eine oszillierende Anströmung, wie sie in Gezeiten und bei Oberflächenwellen auftritt, untersucht werden. Dies ist aber mit erheblichem Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Numerische Simulationen könnten mittels eines geeigneten Modells schneller zu Ergebnissen führen.

Mit dieser Arbeit soll zunächst mittels numerischer Verfahren erreicht werden, eine korrekte Darstellung von auf Boden lagernden Objekten zu erhalten. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die Bestimmung der Wandschubspannung τ_w am Boden.

$$\tau_w = \mu \sqrt{\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial z}\right)^2} \Bigg|_{z=0} \quad (1)$$

Die Wandschubspannung wiederum geht in den Shieldsparameter

$$\theta = \frac{\tau_w}{(\rho_s - \rho_f)gd_{50}} \quad (2)$$

ein, der die an einem mittleren Korn mit dem Durchmesser d_{50} entstehende Auftriebskraft durch Berücksichtigung der Dichtedifferenz zwischen dem Sand ρ_s und dem Fluid ρ_f enthält (siehe Shields 1936). Wenn der Shieldsparameter θ über einem kritischen Wert θ_{cr} liegt, ist die Bedingung für einen Sedimenttransport erfüllt. Der kritische Shieldsparameter ist u. a. abhängig von der Korn Reynoldszahl und der Hangneigung des Sedimentbetts. Somit hat

also die Strömungsstruktur einen direkten Einfluss auf den Sedimenttransport in der Objektumgebung.

Ein geeignetes Sedimenttransportmodell soll in OpenFOAM implementiert werden. OpenFOAM ist ein frei zugängliches Softwarepaket zur Simulation von Strömungsphänomenen, welches sehr flexibel eingesetzt werden kann. Das Spektrum an untersuchten Objekten umfasst einen um 10 % eingesunkenen Zylinder, einen Würfel, sowie einen um 10 % eingesunkenen Quader mit quadratischer Grundfläche. Alle diese Objekte sind auf einer ebenen Platte angeordnet.

Für die Validierung der numerischen Simulation des Zylinders werden experimentelle Untersuchungen herangezogen, die am Lehrstuhl Strömungsmechanik durchgeführt wurden. Untersuchungen von Hussein und Martinuzzi 1996 dienen der Validierung der Würfelumströmung.

Experimentelle Untersuchungen

Am Lehrstuhl Strömungsmechanik wurde die Umströmung eines quer liegenden Zylinders untersucht. Der Zylinder wurde auf einer Platte montiert, die sich in einem offenen Windkanal befindet. Dabei wurde der Zylinder um 10 % des Durchmessers auf der Unterseite abgefräst. Dies ermöglicht eine einfachere Erstellung eines Rechengitters für die später durchgeführte Simulation. Somit berührt der Zylinder die Plattenoberfläche nicht mehr tangential sondern unter einem Winkel von etwa 37° , was zu weniger stark verzerrten Zellen in der Nachbildung des Experiments führt. Der Zylinder hat einen Durchmesser D von 58 mm und eine Länge L von 190 mm. Der Abstand der Vorderkante der Platte zum Zylinder beträgt $x/D = 3,7$. Die Anströmgeschwindigkeit U_0 liegt bei 40 m/s. Dies ergibt eine Reynoldszahl von $1,5 \cdot 10^5$. Dies entspricht der Reynoldszahl, die man bei der Umströmung von am küstennahen Meeresboden lagernden Objekten im Ozean finden kann. Die Turbulenzintensität des Windkanals beträgt 0,5 %. Mittels Stereo-PIV Messungen wurden alle drei Geschwindigkeitskomponenten im Bereich hinter dem Zylinder gemessen. Über mehrere Ebenen konnte so ein zeitgemittelttes 3D-Geschwindigkeitsfeld im Bereich hinter dem Zylinder dargestellt werden. Abb. 1 links zeigt die so ermittelten Strömungsstrukturen. Die Isofläche stellt das Rückstromgebiet dar. Innerhalb der Einhüllenden ist die Hauptströmungskomponente negativ, also entgegen der Anströmrichtung orientiert. Außerhalb dieses Gebietes sind die Strömungskomponenten in Richtung der Anströmung orientiert. Die Stromlinien lassen einen bogenförmigen Wirbel im Nachlauf des Zylinders erkennen. Näheres zum Messaufbau und des Messsystems lässt sich in Menzel et al. 2012 finden.

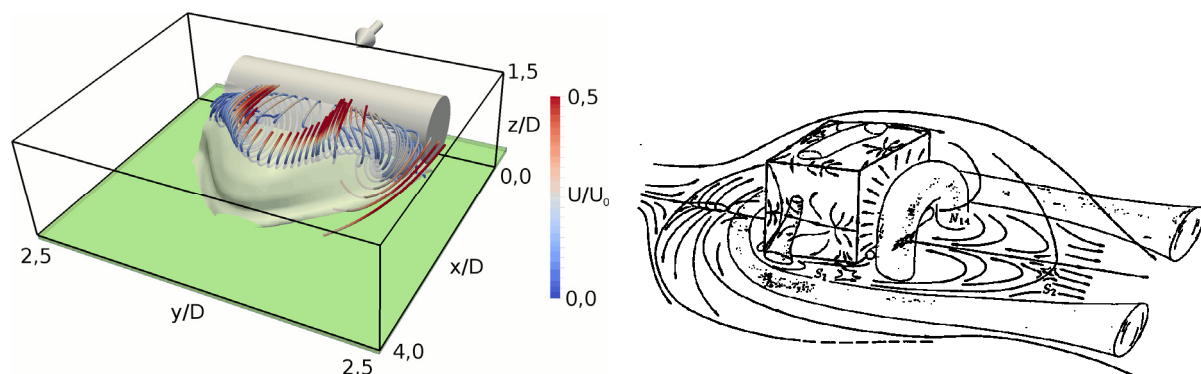


Abb. 1: Wirbelstrukturen um Zylinder und Würfel auf einer Platte, links: Darstellung der Stromlinien und der Einhüllenden des Rückstromgebietes am liegenden Zylinder nach Menzel 2012, rechts: Strömungsstrukturen nach Hussein und Martinuzzi 1996

Untersuchungen zur Würfelumströmung auf einer Bodenplatte wurden 1996 von Hussein und Martinuzzi durchgeführt. Der Würfel mit der Kantenlänge H wurde in einen $2H$ hohen und $24H$ breiten geschlossenen Windkanal untersucht. Der Abstand des Würfels zum Einlass des Kanals beträgt $54H$. Die Reynoldszahl hat einen Wert von $0,8 \cdot 10^5$. Die Geschwindigkeitsfeldmessungen wurden mittels LDA-Technik durchgeführt. Abb. 1 rechts zeigt die Strömungsstrukturen hinter einem auf einer Bodenplatte angebrachten Würfel. Es bilden sich hier ein Hufeisenwirbel vor und seitlich des Zylinders, sowie ein Bogenwirbel hinter dem

Würfel aus. Solch einen Hufeisenwirbel lässt sich auch bei der Zylinderumströmung finden, ist jedoch in Abb. 1 (links) nicht dargestellt.

Numerische Simulationen

Es wurden numerische Simulationen von drei verschiedenen Objekten durchgeführt.

1. Ein auf dem Boden liegender endlicher Zylinderabschnitt wie er am Lehrstuhl Strömungsmechanik analysiert wurde,
2. ein auf einer Platte montierter Würfel wie er von Hussein und Martinuzzi 1996 untersucht wurde und
3. ein quer angeströmter Quader, der ebenfalls auf einer Bodenplatte befestigt ist.

Die Simulation wurde mittels der RANS Methode durchgeführt. Es wurde das $k-\omega$ -Turbulenzmodell genutzt. Das genutzte Diskretisierungsschema ist das upwind-Verfahren. Bei der Würfelumströmung wurde weiterhin das limitedLinear-Verfahren angewendet. Der Vorteil des upwind-Verfahrens ist die schnelle Konvergenz bei gleichzeitig hoher numerischer Stabilität. Allerdings ist dieses Verfahren stark diffusiv. Dem limitedLinear-Verfahren sollen auch die Vorteile des upwind-Verfahrens innewohnen, jedoch ist die numerische Diffusion nicht mehr so stark ausgeprägt (siehe Hartig 2012).

Die Randbedingungen für die numerische Simulation des Zylinders entsprechen denen aus dem Experiment am Lehrstuhl Strömungsmechanik. Der Zylinder hat die gleichen Abmessungen wie ebenfalls zu einer Reynoldszahl von $1,5 \cdot 10^5$ führt. Abb.2 zeigt die Rechendomäne der Simulation des Zylinders.

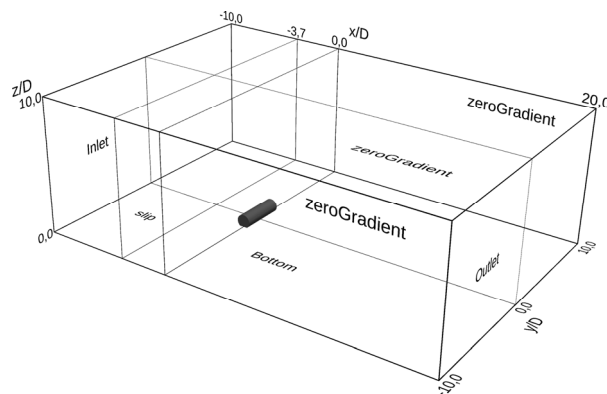


Abb. 2: Domain der Simulation des Zylinders

Vom Einlass (Inlet) bis zum Punkt $x/D = -3,7$ ist die Bodenplatte noch mit einer slip-Randbedingung behaftet. Ab diesem Punkt bis zum Auslass beginnt die Simulation der Bodenplatte mit der Hafttrandbedingung $U(z=0) = 0$ (Bottom). Der erhöhte Abstand der Einlassfläche zum Zylinder soll numerische Reflexionen verhindern. Alle anderen Seitenwände sind mit der Neumann-Randbedingung (zeroGradient) behaftet. Das Rechengitter ist aufgrund der komplexen Geometrie unstrukturiert und wurde mittels snappyHexMesh erstellt. Die Zellenanzahl liegt bei etwa 800.000 Zellen. Die y^+ -Werte auf dem Zylinder liegen im Mittelwert bei 2.

Die Randbedingungen der Würfelumströmung entsprechen ebenfalls den Randbedingungen aus dem Experiment. Die Abmessung der Rechendomäne entspricht den Abmessungen des geschlossenen Kanals. Somit sind auch alle Seitenwände sowie die Bodenplatte vom Einlass bis zum Auslass mit der Hafttrandbedingung belegt. Das Rechengitter wurde aufgrund der einfacheren Geometrie strukturiert mittels blockMesh erstellt. Es wurden insgesamt etwa 3 Mio. Zellen genutzt. Die y^+ -Werte auf allen Oberflächen liegen im Mittelwert bei 1.

Die Strömungssimulation des Quaders wurde mit exakt den gleichen Randbedingungen der Zylindersimulation durchgeführt. Lediglich das Objekt wurde durch einen Quader mit einer Kantenlänge der Grundfläche von 58 mm und einer Gesamtlänge von 190 mm ersetzt, was zur gleichen Reynoldszahl wie beim Zylinder führt ($Re = 1,5 \cdot 10^5$). Der Quader ist ebenfalls um 10 % eingesunken. Das Strömungsgebiet ist wiederum, wie bei der Würfelumströmung,

strukturiert vernetzt worden. Die Zellenanzahl liegt bei etwa 600.000 Zellen. Die y^+ -Werte liegen im Mittelwert bei 1.

Ergebnisse

Die halbtransparente Fläche in Abb. 3 zeigt die Ausdehnung des Rückstromgebietes im Bereich um den Zylinder. Weiterhin sind die Stromlinien des Hufeisenwirbel-Systems sowie des Bogenwirbels im Nachlauf gekennzeichnet.

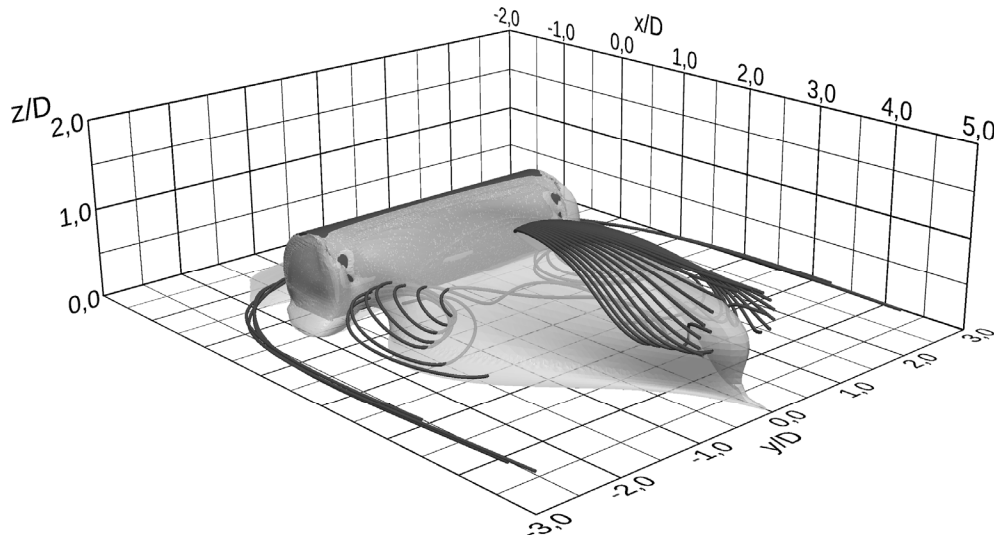


Abb. 3: Rezirkulationsgebiet und Stromlinien im Bereich um den Zylinder

Die Wiederanlegung des Ablösegebietes in der Mittelebene ($y/D = 0$) erfolgt bei etwa $x/D = 4,5$. Im Experiment erfolgt das Wiederanlegen bei etwa $x/D = 2,7$. Eine RANS-Rechnung mit entsprechendem Turbulenzmodell neigt dazu die Größe des Rezirkulationsgebietes zu überschätzen (Leder 1992). Auch bei Iaccarino et al. 2003 zeigte sich dieses Phänomen. Selbst ein Umstieg auf eine genauere Methode wie LES würde nicht unbedingt eine Verbesserung erzwingen, wie in Nigro 2005 beschrieben. Der Bogenwirbel hinter dem Zylinder schließt sich nicht so deutlich, wie im Experiment zu erkennen ist. Auch neigt sich der obere Bereich des Wirbels stromab. In Abb. 4 wird das Q-Kriterium mit der skalierten Wirbelstärke in x-Richtung dargestellt.

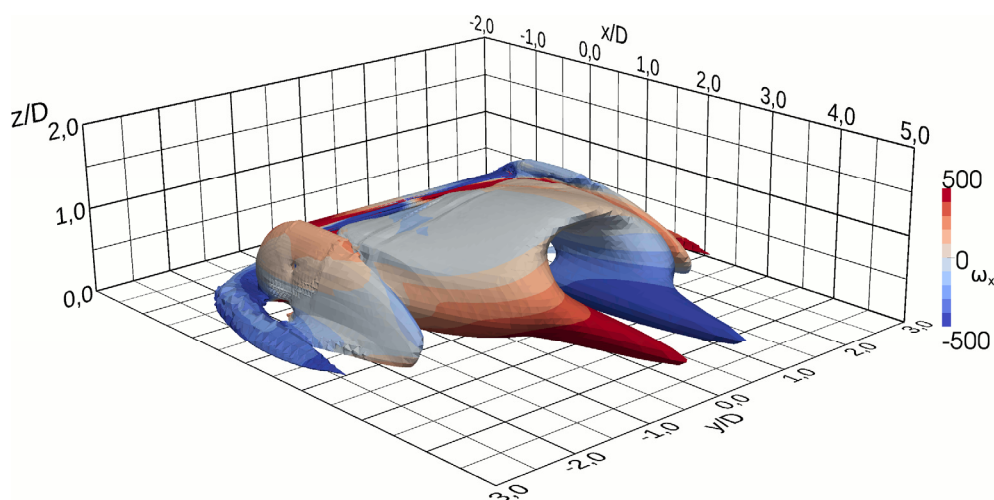


Abb. 4: Q-Kriterium, die Farbskala zeigt die Wirbelstärke in x-Richtung im Bereich um den Zylinder

Hier sind zwei in Bodennähe befindliche Wirbelstrukturen mit prägnanter Ausdehnung in x-Richtung zu erkennen. Anhand der Richtung der Wirbelstärke kann man hier die entgegengesetzte Drehrichtung zum ebenfalls dargestellten Hufeisenwirbel der jeweiligen Seite erkennen. Dieses Wirbelpaar ist auch in den Stromlinien in Abb. 3 wiederzufinden.

Abb. 5 zeigt die Rückstromgebiete mit den großen Wirbelstrukturen um den Würfel für beide Diskretisierungsschemata. Der Hufeisenwirbel sowie der nun vollständig geschlossene Bogenwirbel sind in beiden Fällen zu erkennen. Die Länge der Rückstromgebiete unterscheidet sich deutlich. Im Fall des upwind-Verfahrens (Abb.5 links) liegt der Wiederanlegepunkt mit $x/H \approx 2,5$ sehr nahe am Wiederanlegepunkt des Experiments mit $x/H = 2,17$. Mit dem limitedLinear-Verfahren (Abb. 5 rechts) hingegen wird das Rückstromgebiet mit $x/H \approx 3,7$ wiederum überschätzt.

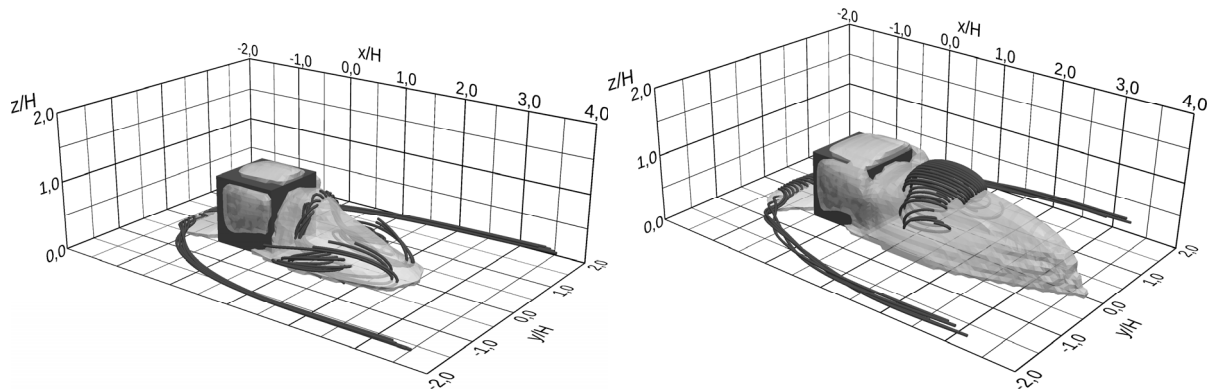


Abb. 5: Rezirkulationsgebiet und Stromlinien im Bereich um den Würfel, links: mit upwind-Verfahren, rechts: mit limitedLinear-Verfahren

Das in Abb. 6 dargestellte Q-Kriterium zeigt beim limitedLinear-Verfahren eine stärkere Ausbildung des Bogenwirbels im Vergleich zum upwind-Verfahren. Beim upwind-Verfahren (Abb. 6 links) sind wiederum zwei Wirbelstrukturen in x-Richtung in Bodennähe zu erkennen. Diese weisen im Gegensatz zu den Wirbeln, die schon bei der Zylinderumströmung ähnlich beobachtet werden konnten, die gleiche Drehrichtung auf, wie der auf der jeweils gleichen Seite befindliche Abschnitt des Hufeisenwirbels. Also genau entgegen der Beobachtung in Abb. 4.

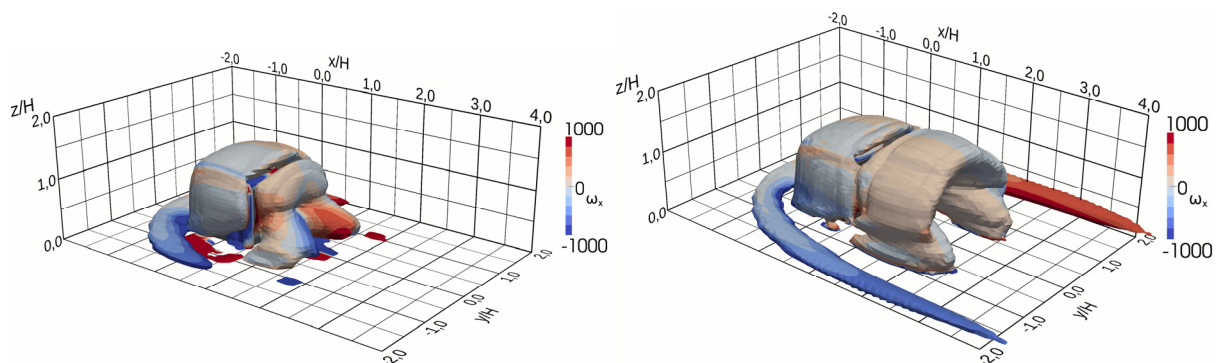


Abb. 6: Q-Kriterium, die Farbskala zeigt die Wirbelstärke in x-Richtung im Bereich um den Würfel, links: mit upwind-Verfahren, rechts: mit limitedLinear-Verfahren

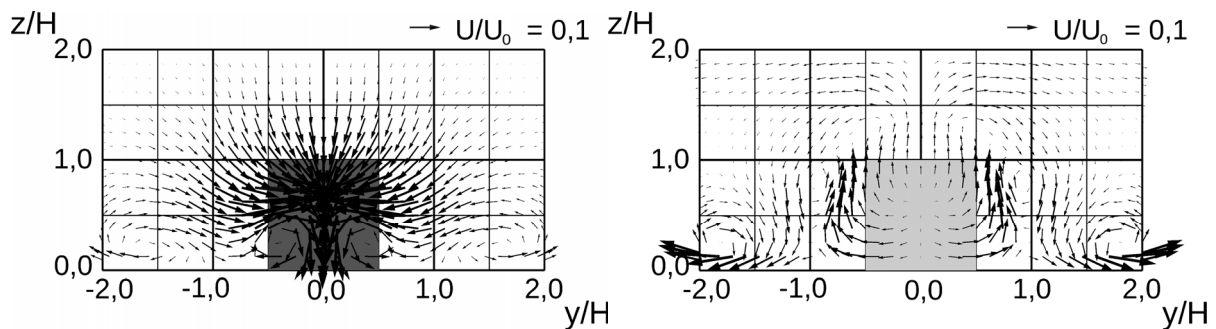


Abb. 7: Geschwindigkeitsvektoren in der y-z-Ebene bei $x/H = 1,25$, links: mit upwind-Verfahren, rechts: mit limitedLinear-Verfahren

Die Abb. 7, welche die Geschwindigkeitsvektoren in der y - z -Ebene bei $x/H = 1,25$ darstellt, stellt dieses Wirbelpaar nochmals dar (upwindVerfahren: links). Beim limitedLinear-Verfahren (Abb. 7 rechts) ist dieses Wirbelpaar nicht zu erkennen.

Anhand dieser Abbildung kann auch ein weiterer Vergleich vorgenommen werden. Das Zentrum des Hufeisenwirbels von Hussein und Martinuzzi 1996 liegt in der gleichen Ebene bei $y/H \approx 1,25$. Bei den hier durchgeführten Simulationen liegt dieses Zentrum bei etwa $y/H \approx 1,6$ (upwind) bzw. $y/H \approx 1,8$ (limitedLinear). Der Hufeisenwirbel weitet sich also etwas zu stark auf.

Das Rückstromgebiet des Quaders mit den Stromlinien des Hauptwirbelsystems wird in Abb. 8 dargestellt. Wenn man diesen Quader mit dem ähnlichen Objekt *Zylinder* vergleicht, fällt hier wieder das stark ausgeprägt Rückstromgebiet auf. Der Bogenwirbel ist auch hier wieder an der Oberseite stromab gerichtet.

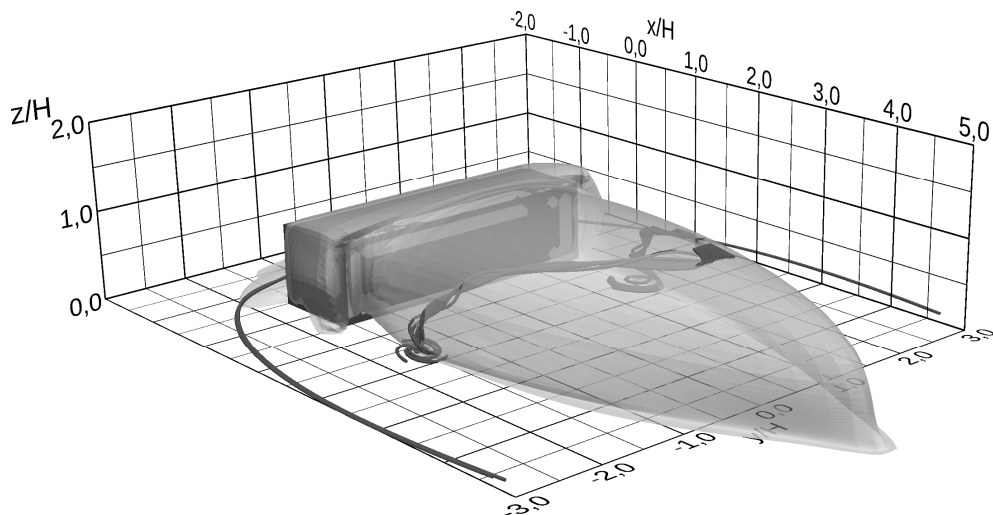


Abb. 8: Rezirkulationsgebiet und Stromlinien im Bereich um den Quader

Das in Abb. 9 dargestellt Q-Kriterium des Quaders zeigt auch hier einen ausgebildeten Bogenwirbel hinter dem Quader. Ähnlich wie schon beim Zylinder sind hier Ansätze eines in x -Richtung gerichteten Wirbelpaares zu sehen. Sie besitzen den gleichen Drehsinn wie schon beim Zylinder zu beobachten war.

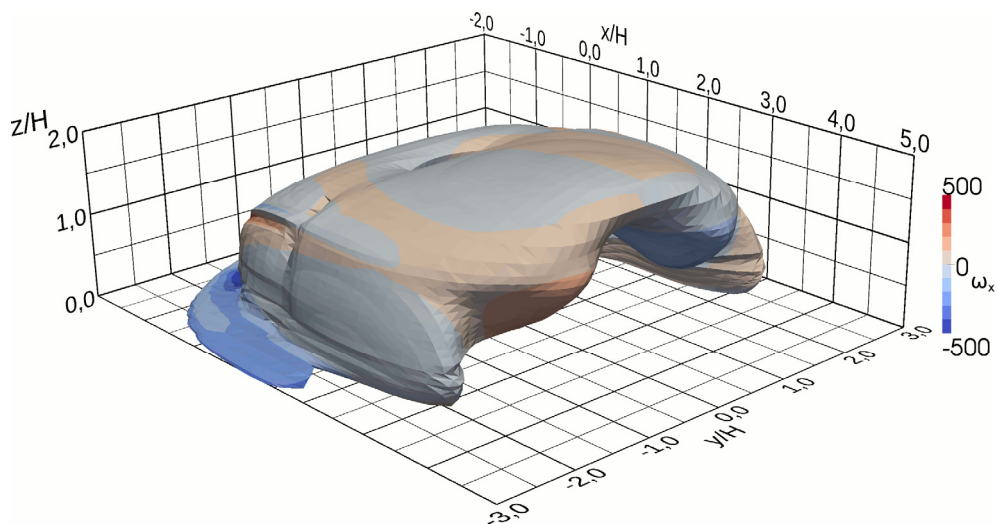


Abb. 9: Q-Kriterium eingefärbt mit Wirbelstärke in x -Richtung im Bereich um den Quader

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurden drei umströmte, auf einer Platte aufliegende Objekte mit unterschiedlicher Geometrie numerisch untersucht. Anhand der Wirbelstrukturen und der Merkmale des Rückstromgebietes wurden Vergleiche zu experimentellen Untersuchungen vorgenommen. Die großen Wirbelstrukturen wie Hufeisenwirbel und Bogenwirbel im Nachlauf eines Objektes dieser Art konnten prinzipiell dargestellt werden. Die zeitgemittelte RANS-Simulation neigt zu einer Überschätzung des Rückstromgebietes. Da teilweise Objekte mit fester Ablöselinie verwendet wurden (Würfel, Quader) ist zu vermuten, dass dies nicht an einer verspäteten Ablösung liegt. Die gestreckten Objekte (Zylinder, Quader) weisen einen an der Oberseite stromab gerichteten Bogenwirbel auf. Bei allen drei Objekten bildeten sich Ansätze eines Wirbelpaares im Nachlauf aus, welche so im Experiment noch nicht beobachtet werden konnten.

Für eine RANS-Simulation mit solch geringer Zelldichte sind die Ergebnisse zufriedenstellend. Es können die wichtigsten Wirbelstrukturen dargestellt werden. Besonders der Hufeisenwirbel, der maßgeblichen Einfluss auf die Auskolkung und die Versandung eines Objektes hat, wird sehr gut wiedergegeben.

Nach Iaccarino et al. 2003 führt eine zeitaufgelöste und nachträglich zeitgemittelte RANS-Simulation zu einer besseren Abschätzung des Rückstromgebietes. Dies soll in den nächsten Schritten in OpenFOAM erprobt werden. Weiterhin soll die Leistungsfähigkeit der RANS-Simulation an weiteren gut untersuchten Strukturen durchgeführt werden. Dazu zählen ein Kreiszyylinderstumpf (siehe Jensch et al. 2007) und ein stehender Quader (siehe Bourgeois et al. 2011).

Literatur

Bourgeois, J. A., Sattari, P. & Martinuzzi, R. J., 2011: "Alternating half-loop shedding in the turbulent wake of a finite surface-mounted square cylinder with thin boundary layer", Phys. Fluids 23, 095101

Hartig, K., 2012: „Einfluss der Interpolationsverfahren auf die Ergebnisse numerischer Berechnungen der Schiffsumströmung“, Diplomarbeit, Universität Rostock, Lehrstuhl Schiffbau

Hussein, H. J. & Martinuzzi, R. J., 1996: „Energy balance for turbulent flow around a surface mounted cube placed in a channel“, Phys. Fluids 8 (3), pp. 764-780

Iaccarino, G., Ooi, A., Durbin, P. A. & Behnia M., 2003: "Reynolds averaged simulation of unsteady separated flow", International Journal of Heat and Fluid Flow 24, pp. 147-156

Jensch, M., Brede, M., Leder, A., Frederich, O., Wassen, E. & Thiele, F., 2007: „Time-Resolved Stereo-PIV Messungen im Kopfbereich und Nachlauf eines Kreiszyylinderstumpfes“, Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 15. Fachtagung 2007, pp. 19-1 – 19-7

Leder, A., 1992: „Abgelöste Strömungen, Physikalische Grundlagen“, Vieweg

Menzel, P., Witte, M. & Leder, A., 2012: "Windkanalexperimente zur Bestimmung der Strömungsstrukturen um einen quer zur Anströmung auf einer Bodenplatte lagernden Zylinderabschnitt.", Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik, 20. Fachtagung 2012, pp. 38-1 – 38-6

Nigro, N., Filippini, G., Franck, G., Storti, M. & D'Elía, J., 2005: "Flow around a sharp-edged surface-mounted cube by large eddy simulation", Mecánica Computacional Vol. XXIV, pp. 1299-1318

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