

PLIF/PIV-UNTERSUCHUNG DER TURBULENTEN MISCHUNG IN GESCHICHTETER STRÖMUNG HINTER EINEM KREISZYLINDER

P. Menzel, F. Hüttmann, A. Leder

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

Zusammenfassung

Zur Abschätzung des Einflusses der Fundamente von Offshore-Windkraftanlagen auf den Einstrom sauerstoffreichen Salzwassers der Nordsee in die Ostsee ist es notwendig, die durch diese Bauwerke verursachte zusätzliche Vermischung der beiden Wasserschichten zu quantifizieren. Hierzu wurden die Strömungsverhältnisse der Ostsee in einem Kanal für geschichtete Strömungen im Labor nachgebildet. Die turbulenten Mischungsvorgänge werden an diesem Versuchsstand mittels laserinduzierter Fluoreszenz (PLIF) und Particle Image Velocimetry (PIV) untersucht. Die daraus resultierende gleichzeitige Messung zweier Geschwindigkeitskomponenten sowie der Salinität ermöglicht es, den turbulenten Transport und Eintrag von Salzwasser in das darüber geschichtete Frischwasser zu bestimmen. Durch Messungen in verschiedenen Ebenen wurde ein Volumendatensatz erstellt. Dieser ermöglicht einen Einblick in die komplexe Strömungsstruktur hinter dem Zylinder sowie die Charakterisierung der durch den Zylinder hervorgerufenen, zusätzlichen Mischung. Es wird herausgestellt, dass sich es Gebiete maximaler turbulenter kinetischer Energie in den Bereichen der Schnittlinien der Mischungsschicht zwischen Frisch- und Salzwasser und der vom Zylinder ablösenden freien Scherschicht gibt.

1 Einleitung

Das Vorhandensein sauerstoffreichen Salzwassers in den tieferen Becken der Ostsee ist hauptsächlich auf den Einstrom von Wasser aus der Nordsee in die Ostsee zurückzuführen [Matthäus 1992]. Dieser Einstrom erfolgt je nach Wetterlage in unregelmäßigen Zeitabständen mehrmals im Jahr [Burchard et al 2005]. Dabei strömt vor allem im Winter sehr sauerstoffreiches Salzwasser der Nordsee größtenteils über die Drogden-Schwelle in das Arkona-Becken (Abbildung 1) und zu einem kleinen Teil über die Darsser-Schwelle. Aufgrund seiner höheren Dichte fließt das salzhaltige Wasser am Meeresboden unterhalb des Brackwassers der Ostsee. Da die Schichtung stabil ist, kann das Salzwasser bis in die tieferen Becken der Ostsee fließen, wo es infolge seines hohen Sauerstoffgehaltes entscheidenden Einfluss auf das dortige Ökosystem hat.

Im Bereich des Arkona-Beckens und der Darsser-Schwelle sind mehrere Offshore-Windparks geplant. Der Einfluss solcher Offshore-Windparks auf den Vogelflug, Mikroorganismen, die Seefahrt, den Tourismus und andere Faktoren wird bereits ausgiebig untersucht. Welchen Einfluss zylinderförmige Fundamente von Windkraftanlagen auf den Salzwassereinstrom aus der Nordsee und die Schichtung hinter einem solchen Hindernis haben, ist bisher weitgehend unbekannt.



Abb. 1: Einstromverhältnisse in die Ostsee sowie geplante Offshore-Windparks (rote Kreise)

Im Rahmen des Verbundprojekts QuantAS-Off (Quantification of Water Mass Transformations in the Arkona Sea: Impact of Offshore Wind Farms) arbeiten das Institut für Ostseeforschung Warnemünde (IOW), das Institut für Strömungsmechanik und elektronisches Rechnen im Bauwesen an der Universität Hannover (ISEB) sowie der Lehrstuhl Strömungsmechanik an der Universität Rostock (Ism) in einer engen Kooperation zusammen, um Vermischungsvorgänge in geschichteten Strömungen zu quantifizieren. Der Ism hat die Aufgabe übernommen, mittels Laborexperimenten zum Verständnis der Strömungsstruktur und der Mischung beizutragen.

2 Randbedingungen und Kenngrößen

Die Grundlage für die Laborexperimente bilden eine idealisierte Topologie des Arkona-Beckens, die Charakteristik der beobachteten Salzwassereinbrüche in die Ostsee sowie eine vereinfachte Geometrie des Unterwasserteils einer Offshore-Windkraftanlage. Die Messungen wurden unter Erhaltung der densimetrischen Froude-Zahl Fr_d durchgeführt, die sich wie folgt ergibt:

$$Fr_d = \frac{U_\infty}{\sqrt{gz_b \frac{\rho_b - \rho_a}{\rho_b}}}$$

Hierbei beschreiben ρ_a die Dichte des ruhenden Frischwassers und ρ_b die Dichte des einströmenden Salzwassers. Die Dicke der Salzwasserschicht wird mit z_b bezeichnet.

Die Reynoldszahl ergibt sich als

$$Re = \frac{U_\infty D}{\nu}$$

mit dem Zylinderdurchmesser D . Der Kanal für geschichtete Strömungen sowie das für die Messungen verwendete Koordinatensystem sind in Abbildung 2 gezeigt. Eine genaue Beschreibung der Kenngrößen sowie der Kanalparameter wurde in [Menzel 2006] vorgenommen.

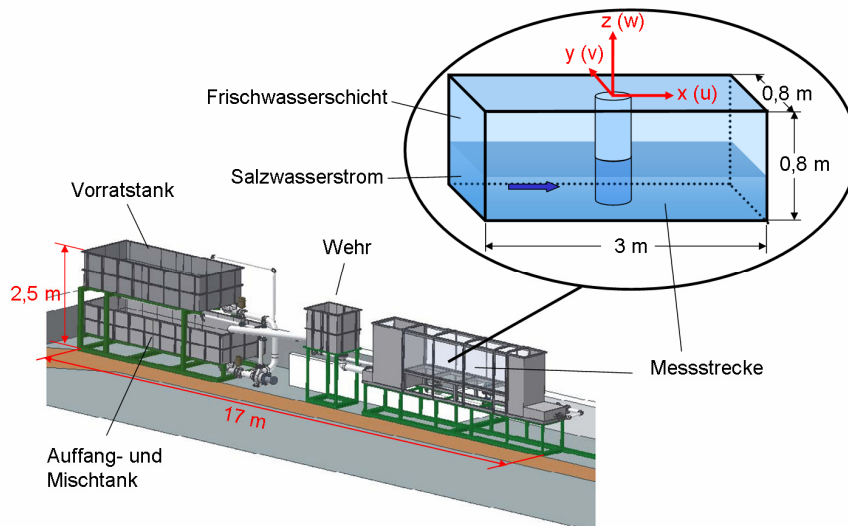


Abb. 2: Kanal für geschichtete Strömungen und das verwendete Koordinatensystem

3 Formung der Einlassbedingungen und Messungen im leeren Versuchskanal

Infolge der maßstäblichen Reduzierung der charakteristischen Längen im Laborversuch ist es nicht möglich, gleichzeitig die densimetrische Froude-Zahl und die Reynolds-Zahl einzuhalten. Da das Verhalten der Mischungsschicht zwischen Frisch- und Salzwasser in erster Linie auf Schwere- und Trägheitskräfte zurückzuführen ist, wurde die densimetrische Froude-Zahl mit $Fr_d=0,5$ eingehalten. Neben der Einhaltung der charakteristischen Ähnlichkeitskennzahl wurde das Geschwindigkeitsprofil in der Zylinderanströmung dem in der Natur vorkommendem nachgebildet. Abbildung 3 zeigt den Einlassbereich in die Messstrecke mit einer nach oben gebogenen Düse in der Vorkammer, durch die Luftblasen aus dem zuströmenden Salzwasser abgeschieden werden.

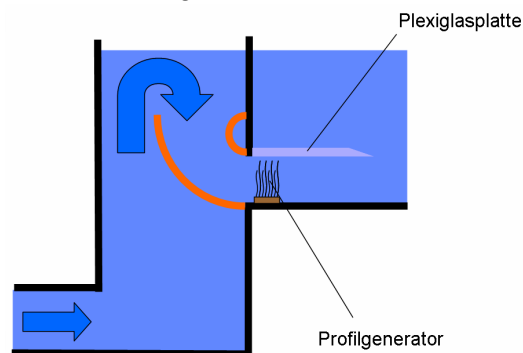


Abb. 3: Vorkammer und Einlass im Kanal für geschichtete Strömungen

Im Anschluss an die Düse wird ein Profilgenerator zur Erzeugung eines den Feldmessungen ähnelnden Geschwindigkeitsprofils eingesetzt. Eine Plexiglasplatte oberhalb des Einlasses verhindert Ablösung und eine damit verbundene frühzeitige Mischung von Frisch- und Salzwasser. In Abbildung 4a ist das in der Ostsee am 7. Februar 2004 nördlich von Kriegers Flak gemessene Geschwindigkeitsprofil dargestellt. Abbildung 4b zeigt das im Kanal für geschichtete Strömungen mittels PIV gemessene Geschwindigkeitsprofil. Beide Profile zeigen eine gute Übereinstimmung in der Form und in der Lage des Geschwindigkeitsmaximums kurz unterhalb der Mischungsschicht. Das Verhältnis von

28.4

Maximalgeschwindigkeit zur Geschwindigkeit bei 50% der Schichthöhe kann im Laborversuch ebenso wie in der Ostsee mit einem Faktor von 1,35 bestimmt werden.

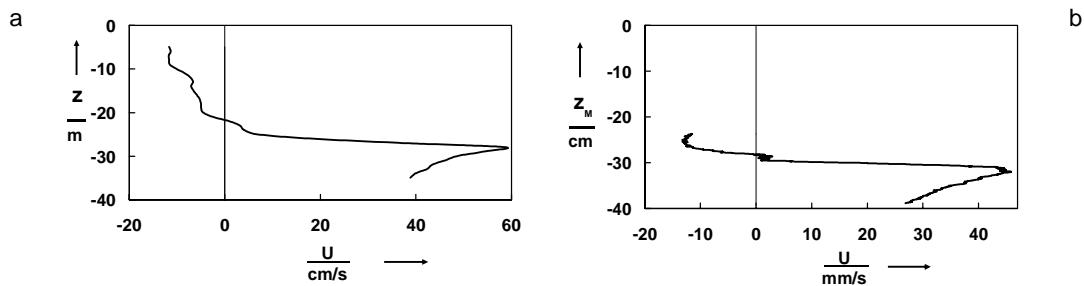


Abb. 4: Geschwindigkeit mit der Wassertiefe in der Ostsee (a) und im Modellkanal (b)

Um eine nominal zweidimensionale Anströmung des Modellzylinders nachzuweisen, wurde das ungestörte Geschwindigkeitsprofil im Kanal an verschiedenen Positionen quer zur Anströmrichtung vermessen. Abbildung 5a zeigt Geschwindigkeitsprofile der x-Komponenten an den Stellen $y=0$ cm, $y=8$ cm ($y/D=1$), $y=16$ cm ($y/D=2$) und $y=24$ cm ($y/D=3$). Die hierzu gemittelten 1000 Geschwindigkeitsfelder wurden bei einer Messfrequenz von 15 Hz aufgezeichnet. Die Darstellung zeigt, dass es nur geringe Abweichungen zwischen den Profilen gibt.

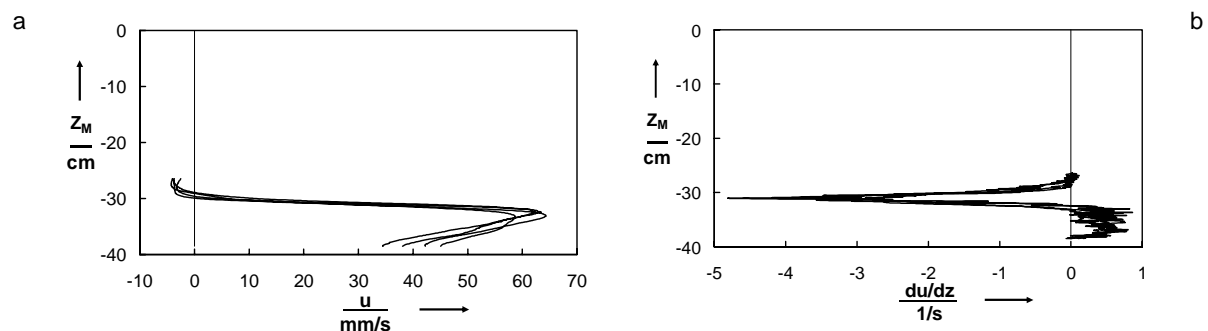


Abb. 5: Geschwindigkeitsprofile über den Kanalquerschnitt im Einlassbereich bei $x = -5$ cm (a) und Gradient der Geschwindigkeiten (b)

Zur Untersuchung der Mischung im Bereich der Grenzschicht zwischen Frisch- und Salzwasser ist neben dem Geschwindigkeitsmaximum in der Schicht auch der Gradient der Geschwindigkeit in diesem Bereich von großer Bedeutung. Der Verlauf des Geschwindigkeitsgradienten in Abbildung 5b zeigt, dass deren absolute Minima vergleichbare Werte annehmen. Auch die Nulldurchgänge, die den vertikalen Abstand zwischen dem jeweiligen Geschwindigkeitsmaximum im Salzwasserstrom und dem Minimum in der Frischwasserschicht charakterisieren, zeigen gleiche vertikale Abstände.

4 Messungen im Versuchskanal mit Zylinder

Zur Untersuchung der turbulenten Mischung zwischen Salzwasserstrom und ruhendem Frischwasser wurden kombinierte PLIF/PIV-Messungen in der x - z -Ebene des Versuchskanals durchgeführt. Hierbei wurden ebenfalls 1000 Geschwindigkeits- und Konzentrationsfelder bei einer Messfrequenz von 15 Hz aufgenommen und im folgenden ausgewertet dargestellt. Der Zylinder mit einem Durchmesser von 8 cm wurde in der

Kanalmitte bezüglich der y-Richtung und 20 cm hinter dem Salzwassereinlass positioniert. Im Zuge erster Untersuchungen zur Mischung wurden unter anderem Messungen im Bereich von $2,12 \text{ m} < x < 2,28 \text{ m}$ in der Mittelachse hinter dem Zylinder durchgeführt. Abbildung 6 zeigt als Farbkontur das Quadrat der Brunt-Väisälä-Frequenz, welche die Schwingungsfrequenz eines Fluidelements um seine Ruhelage beschreibt und allgemein wie folgt berechnet wird:

$$N^2 = -\frac{g}{\rho_0} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

Zusammen mit dem Quadrat der horizontalen Scherrate

$$S^2 = \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2$$

ergibt sich die Gradient-Richardsenzahl

$$Ri_G = \frac{N^2}{S^2},$$

welche die Stabilität eines geschichteten Fluides charakterisiert. Das Quadrat der Brunt-Väisälä-Frequenz ist außerdem proportional zum vertikalen Dichtegradienten und somit auch proportional zum Gradienten der Salinität, so dass die Farbskala in Abbildung 6 Aufschluss über die vertikale Ausdehnung der Mischungsschicht gibt. Zur weiteren Verdeutlichung sind zusätzlich die Isolinien konstanter Salinität bei 30%, 50% und 70% des Maximalwertes sowie ein Tiefenschnitt der Salinität eingezeichnet. Die mit Vektorpfeilen dargestellte Geschwindigkeitsverteilung zeigt, dass auch im Bereich sehr niedriger Salinitäten positive Geschwindigkeiten bezüglich der Hauptströmungsrichtung herrschen, was auf den Eintrag von Impuls in die ruhende Frischwasserschicht stromaufwärts hindeutet.

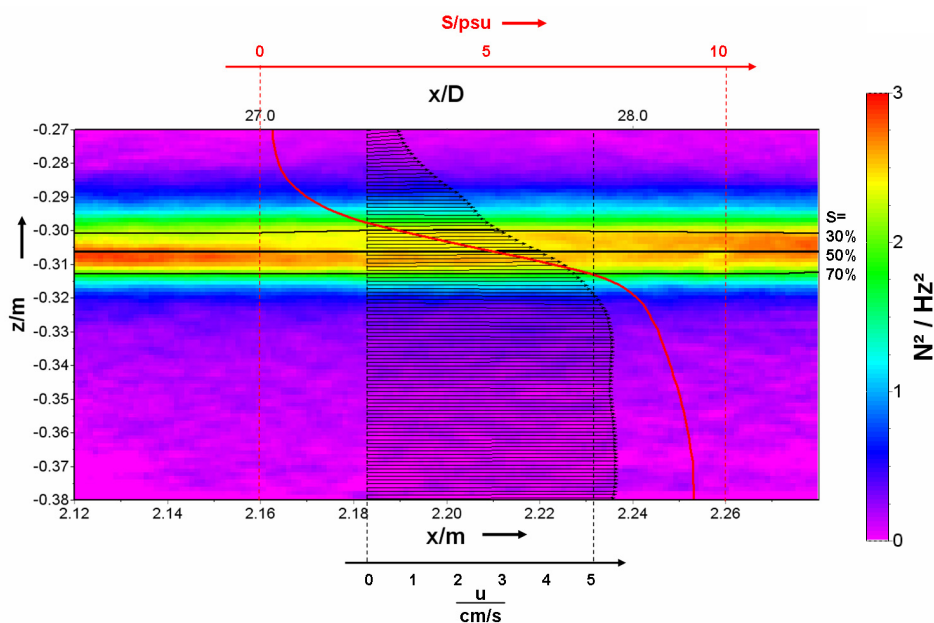


Abb. 6: Quadrat der Brunt-Väisälä-Frequenz als Farbkontur, Verlauf der Salinität (vertikales Profil), Geschwindigkeitsvektoren und Isolinien der Salinität bei 30% (oben), 50% (mitte) und 70% (unten) des Maximalwertes.

Dass es eine Beeinflussung der Frischwasserschicht durch den Salzwasserstrom gibt, lässt sich mit dem in der Frischwasserschicht gemessenen Impuls am Ende des Kanals (Abbildung 6) begründen, der an dieser Stelle bei Messungen ohne Zylinder nicht vorhanden ist. Diese Messungen implizieren, dass eine Mischung sowie ein signifikanter Impulseintrag im Nahbereich hinter dem Zylinder stattfinden muss. Des Weiteren wird der Beitrag des

28.6

Zylinders zur Mischung beider Schichten im Modellkanal hauptsächlich im Nahfeld von Bedeutung sein und im Fernfeld gegenüber den sonstigen Mischungseffekten eher eine untergeordnete Rolle spielen. Dies wird durch Messungen gestärkt, die im Nahfeld durchgeführt wurden.

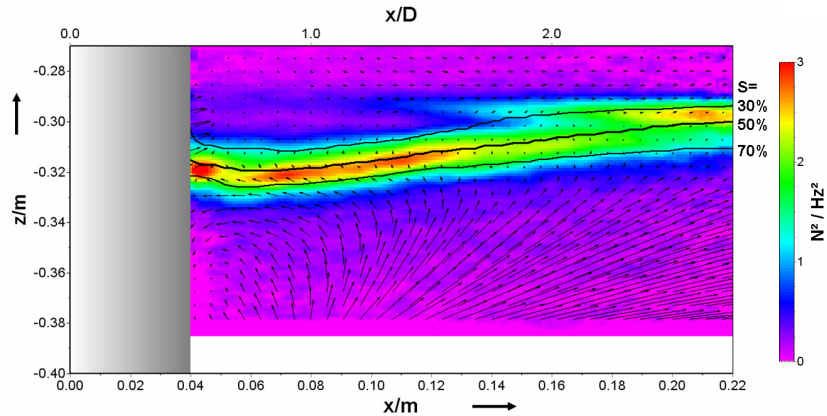


Abb. 7: Quadrat der Brunt-Väisälä-Frequenz als Farbkontur, Geschwindigkeitsvektorfeld und Isolinien der Salinität bei 30% (oben), 50% (mitte) und 70% (unten) des Maximalwertes.

Abbildung 7 zeigt eine Messung in der Mittelachse ($y/D=0,0$) hinter dem Zylinder. Hier ist wieder das Quadrat der Brunt-Väisälä-Frequenz als Maß für den vertikalen Dichtegradient sowie die Isolinien konstanter Salinität bei 30%, 50% und 70% des Maximalwertes aufgetragen. Der Verlauf der Isolinien verdeutlicht, dass es eine Absenkung der Mischungsschicht direkt hinter dem Zylinder gibt, die bis etwa $2,5D$ hinter dem Zylinder noch nachweisbar ist. Das ebenfalls in Abbildung 7 dargestellte mittlere Geschwindigkeitsfeld zeigt eine starke Aufwärtskomponente des Salzwasserstroms im Bereich von $x/D > 1$ und eine daraus resultierende mittlere Drehung im Bereich von $0,5 > x/D > 1,5$. Diese Aufwärtskomponente im Bereich von $x/D = 2$ sorgt dort für einen Impuls in vertikaler Richtung und eine damit verbundene Auslenkung der Mischungsschicht nach oben. Infolge der Verringerung des Dichtegradienten (niedrigere Brunt-Väisälä-Frequenz) im Bereich $x/D = 2$ verringert sich die Stabilität der Schichtung und der Eintrag von Salzwasser in höhere gelegene Bereiche wird erleichtert.

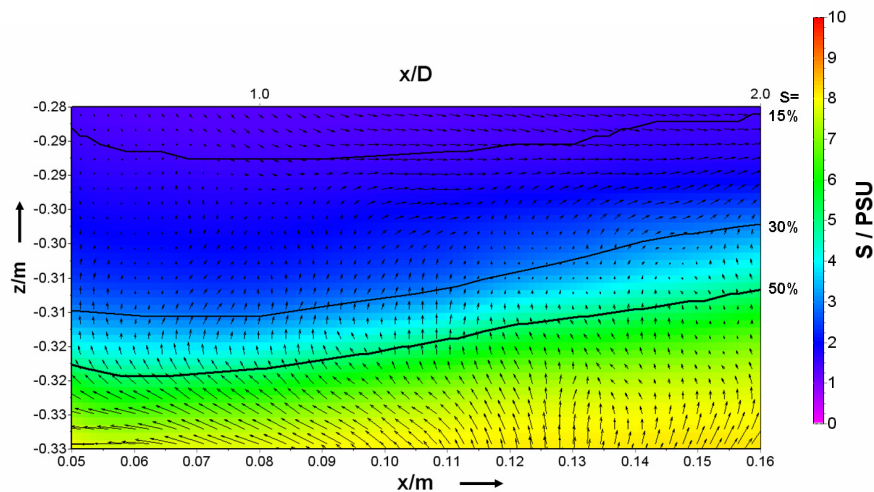


Abb. 8: Salinität, Geschwindigkeitsfeld und Isolinien der Salinität bei 15%, 30% und 50% des Maximums.

Im Bereich von $0,5 > x/D > 2$ sorgt die Vertikalkomponente der mittleren Geschwindigkeit für einen Eintrag von Salzwasser in das Gebiet oberhalb des abgesenkten Salzwasserstroms, was in Abbildung 8 durch die Isolinien der Salinität sowie das Geschwindigkeitsfeld verdeutlicht wird. Der größere Abstand der Isolinien nahe des Zylinders zeigt die Verbreiterung der Mischungsschicht in diesem Bereich. Fluid aus dieser Region kann somit leicht abtransportiert werden.

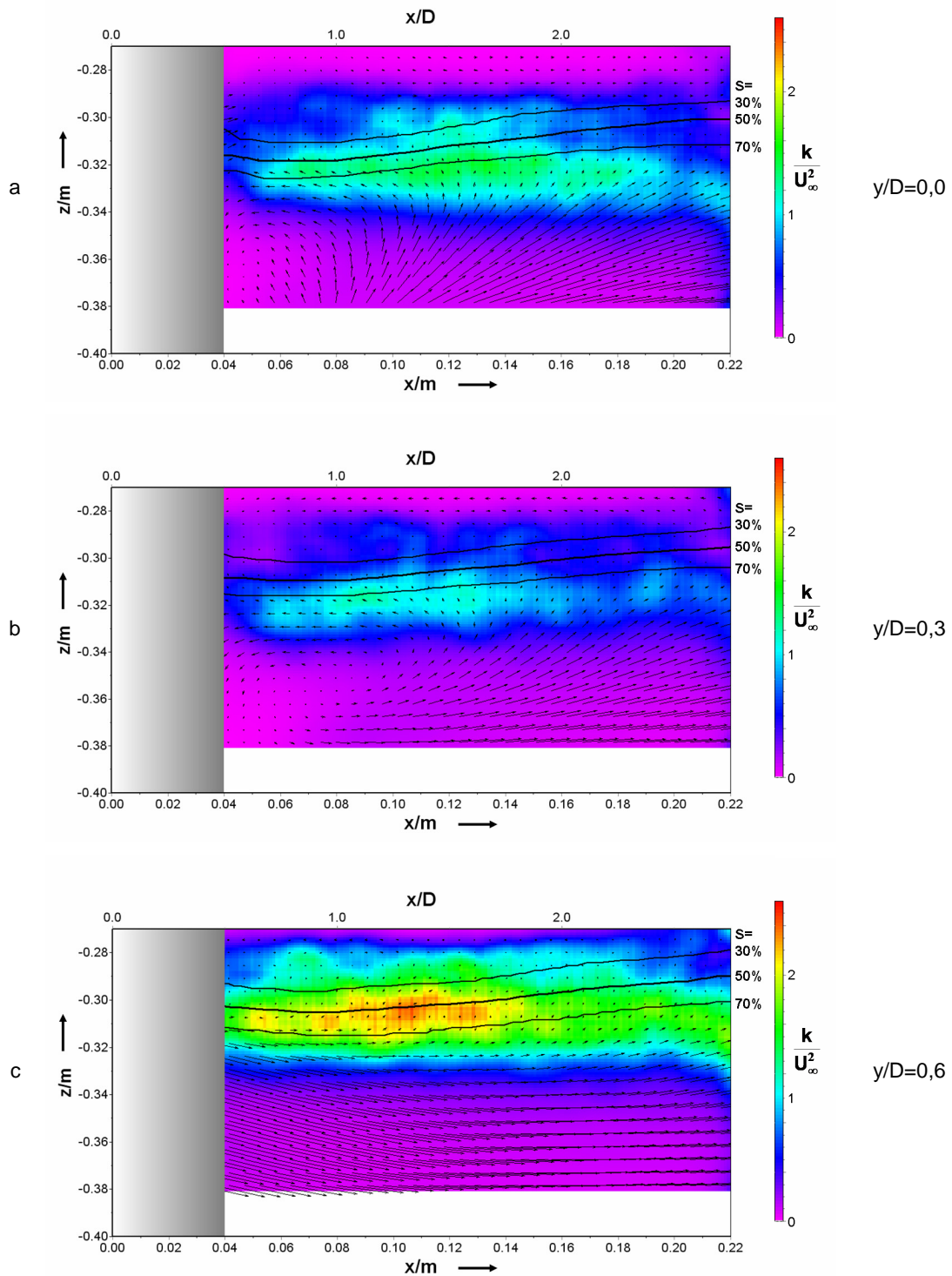


Abb. 9: Turbulente kinetische Energie sowie Isolinien der Salinität und Geschwindigkeitsfelder bei $y/D=0,0$ (a), $y/D=0,3$ (b) und $y/D=0,6$ (c).

28.8

Um die Strömungsstruktur und die damit verbundenen Mischungseffekte im nahen Zylindernachlauf genauer zu verstehen ist es notwendig das komplette Volumen in diesem Bereich zu betrachten. Hierzu werden im Folgenden Messungen bei $y/D=0,0$ (Abbildung 9a), $y/D=0,3$ (Abbildung 9b) und $y/D=0,6$ (Abbildung 9c) untersucht. Zu sehen sind die Geschwindigkeitsfelder sowie die Isolinien der Salinität bei 30%, 50% und 70% des Maximalwertes. Als Farbkontur ist die turbulente kinetische Energie aufgetragen. Die Abbildungen zeigen ein Maximum der turbulenten kinetischen Energie bei $y/D=0,6$ im Bereich der Schnittlinie zwischen der Mischungsschicht und der vom Zylinder ablösenden freien Scherschicht. Ebenfalls sichtbar ist ein Absinken der Mischungsschicht im Bereich der Mittelachse hinter dem Zylinder sowie eine charakteristische Rückströmung im nahen Zylindernachlauf.

Aus den Abbildung 9a-c ergibt sich die Notwendigkeit von 3-Komponenten-Geschwindigkeitsmessungen, um die komplexe Strömungsstruktur hinter dem Zylinder vollständig auflösen zu können, und die notwendigen Annahmen bei der Berechnung der turbulenten kinetischen Energie zu überprüfen. Neben den geplanten 3-Komponenten PIV-Messungen sind Messungen unter Variation der densimetrischen Froude-Zahl sowie des Anström-Geschwindigkeitsprofils $\bar{U}_\infty(z)$ vorgesehen.

Dankesworte

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben „Quantifizierung von Wassermassen-Transformationsprozessen in der Arkonasee – Einfluss von Offshore-Windkraftanlagen, Teilprojekt: Fließexperimente“ wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unter dem Förderkennzeichen 0329957A gefördert. Die Autoren bedanken sich beim BMU für die Förderung des Projektes. Des Weiteren Danken wir Herrn Dr. M. Brede für die fachliche Unterstützung und Herrn B. Scholz für die Durchführung und Auswertung der Referenzmessungen im leeren Kanal.

Literatur

Burchard, H.; Lass, H. U.; Mohrholz, V.; Umlauf, L.; Sellschopp, J.; Fiekas, V.; Bolding, K.; Arneborg, L. [2005]: Dynamics of medium-intensity dense water plumes in the Arkona Basin, Western Baltic Sea; submitted to Ocean Dynamics, January 2005

Matthäus, W.; and H. Frank, Characteristics of major Baltic inflows – a statistical analysis, Cont. Shelf Res., 12, 1375-1400, 1992

Menzel, P.; Richter F.; Leder, A.; Schichtkanal zur Untersuchung von Mischungsvorgängen in geschichteten Strömungen hinter einem Kreiszyylinder mittels PIV/PLIF in Dopheide, D.; Müller, H.; Strunck, V.; Ruck, B.; Leder, A. (Hrsg.), Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik – 14. Fachtagung der GALA e.V. 2006, GALA e.V., PTB Braunschweig, S 55.1-55.8, 2006