

PIV-LIF Untersuchung des Grundwassereintrags in marinen Bodengrenzschichten bei verschiedenen Wellenszenarien

PIV-LIF Experiments on the ground water discharge in oceanic bottom boundary layers during different wave conditions

Nils Karow, Jacob Groß, Sven Grundmann, Martin Brede

Universität Rostock, Lehrstuhl Strömungsmechanik, Albert-Einstein-Str. 2, 18059 Rostock

Marine Bodengrenzschicht, Grundwassereintrag, Turbulenz, Mischung
Oceanic bottom boundary layer, groundwater discharge, turbulence, mixing

Zusammenfassung

Der submarine Grundwassereintrag (SGD) ist ein Mechanismus, welcher unsere Ökosysteme im küstennahen Bereich sehr stark beeinflussen kann [Burnett et al. 2006], [Leote et al. 2008], [Moore 2010], [Robinson et al. 2007]. Der SGD ist nach [Slomp and van Cappellen 2004] maßgeblich am Nährstoff- und Sauerstoffeintrag in den Nahküstenbereich beteiligt. In vielen Gebieten auf der Welt wurden SGD Einträge untersucht [Beck et al. 2016], [Leote et al. 2008], [Taniguchi et al. 2006], [Rapaglia et al. 2012]. Im DFG Graduiertenkolleg Baltic Transcoast wird der Einfluss dieses Phänomens auf unsere hiesigen Küstenbereiche erforscht. Verschiedene Projekte analysieren aus unterschiedlichen Fachbereichen den Transport von Nährstoffen und ihren Einfluss auf die hiesige Pflanzen und Tierwelt. Im Teilprojekt „Waves and Turbulence on Wavy Coastal Seabeds Inducing Vertical Scalar Transport“ ist speziell die Mischung von SGD über dem permeablen Meeresboden der Fokus eines Laborexperiments.

In einem Laborexperiment werden Versuche in einem Wasserkanal mit Hilfe laseroptischer Messmethoden durchgeführt. Ein Piston-Type Wellengenerator erzeugt Übergangswellen wie sie näherungsweise im Untersuchungsgebiet gemessen wurden. Diese laufen in der Messebene über ein permeables Medium, welches den Ostseeboden nachbildet. Unterhalb dieses Bodens wird Rhodamin 6G als fluoreszierender Tracer eingebracht, welcher mit Hilfe der laserinduzierten Fluoreszenz (LIF) quantitativ erfasst werden kann. Simultan zur LIF wird die Particle Image Velocimetry (PIV) angewendet, um das vorliegende Geschwindigkeitsfeld aufzunehmen.

In den Versuchen wurden drei verschiedene Wellenszenarien simuliert und jeweils zwei verschiedene poröse Medien eingesetzt. Für die verschiedenen Parameter wurden die Reynoldsflüsse bestimmt und die Mischungsweglängen ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich für verschiedene Wellenformen und poröse Untergründe unterschiedliche Mischungsweglängen ergeben.

Einleitung

In der Natur ist es oftmals schwierig ein Phänomen ungestört und detailliert zu beobachten. Der Transport und das Ausbreitungsverhalten von Nährstoffeinträgen aus dem Meeresboden in die Wassersäule der Ostsee zählen zu diesen. Deshalb wird das Mischungs- und Ausbreitungsverhalten spezifischer Tracer in einem Laborexperiment umgesetzt. Das Experiment ist an der Universität Rostock am Lehrstuhl für Strömungsmechanik in einem Wasserkanal aufgebaut. Hier wird als Modellfluid für den submarinen Grundwassereintrag Wasser mit ein fluoreszierendem Farbstoff durch einen durchlässigen, verstellbaren Modellboden eingebracht. Dieses Tracerfluid wird unter Wellenbewegung angeströmt und erfährt so einen Energieeintrag. Aufgrund dieses Energieeintrags wird ein spezifisches Ausbreitungsverhalten des Stoffes in der Wassersäule initiiert. Das Verhalten wird durch ein PIV-LIF System aufgenommen und anschließend ausgewertet.

Referenzgebiet Hüttelmoor

Das Graduiertenkolleg Baltic Transcoast untersucht die Wechselwirkung zwischen dem Land und dem Meer an einem Küstenabschnitt in der Ostsee. Dieses Naturschutzgebiet Heiligensee Hüttelmoor befindet sich im Nordosten der Hansestadt Rostock. Um die dort vor der Küste auftretenden Wellenverhältnisse zu ermitteln, wurde ein akustisches Messgerät (AWAC - Acoustic wave and current profiler) der Firma Nortek ausgebracht (siehe Abbildung I).



Das Gerät befindet sich 1000m vom Strand entfernt in einer Wassertiefe von 4,5m. Die unmittelbare Umgebung wurde so gewählt, das möglichst wenig Sedimenttransport und demzufolge Versandung auftreten kann (siehe Abbildung II). Die Messungen erfolgen ganzjährig und somit kann ein genaues Profil erstellt werden, welche Wellenverhältnisse vorherrschend in diesem Gebiet sind. Das Auslesen des Messgerätes erfolgte im Vierteljahrestakt.

Abbildung I: AWAC [Schade, personal communication]

Im Vergleich der ermittelten Messwerte mit weiteren vorliegenden Messungen in der Nähe des Untersuchungsgebietes zeigte sich, dass bereits dieser eine Wellenprofiler eine zuverlässige Abschätzung der charakteristischen Wellenverhältnisse ermöglicht. Das Gerät liefert Kenngrößen der Wellengeschwindigkeiten an der Oberfläche, der Wasserspiegelauslenkung, der Druckverteilung an der Oberfläche des Gerätes und erstellt ein Geschwindigkeitsprofil der Wassersäule. Die Wellengeschwindigkeiten in der Wassersäule und direkt über dem Boden können nur theoretisch, ausgehend von diesen Messdaten, ermittelt werden.

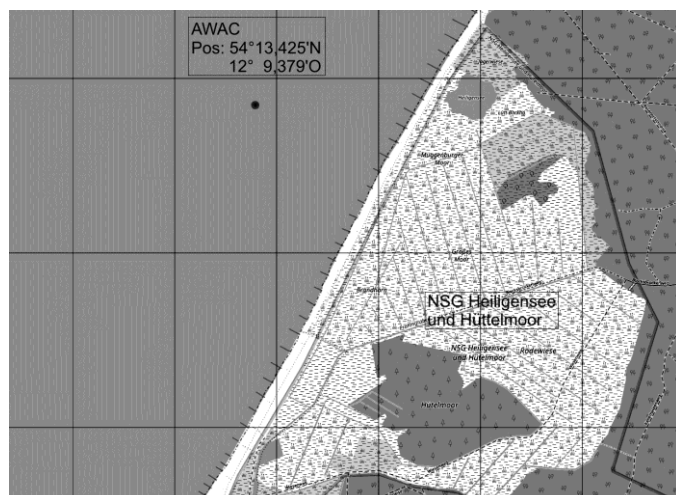


Abbildung II: Positionierung des AWAC (OpenSeaMap)

Grundlagen der Wellentheorie

Die Wellentheorie ist im Hinblick auf die Auswertung von Ozeandaten unumgänglich. Sie ist ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen, um die experimentell ermittelten Werte auswerten zu können. Ozeanwellen werden grundsätzlich in drei verschiedene Bereiche unterteilt. In die Tiefwasserwellen, Flachwasserwellen und den Übergangsbereich. Diese Unterteilung wird durch das Verhältnis der Wassertiefe zur Wellenlänge bestimmt. Eine Übersicht liefert Abbildung III.

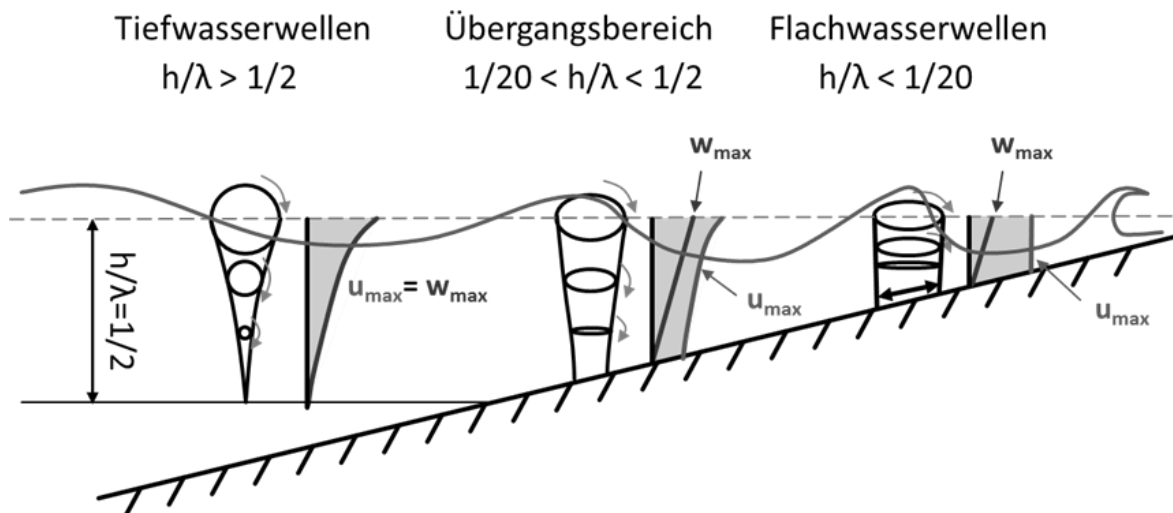


Abbildung III: Kategorisierung der Wellentypen

Die Wellentypen unterscheiden sich grundsätzlich in Ihren Geschwindigkeits- und Bewegungsmerkmalen der Wasserpartikel. So ist das Verhältnis der Horizontalen Geschwindigkeitskomponente u_{\max} zur vertikalen Komponente v_{\max} im Tiefwasserbereich ausgeglichen. Bewegen sich die Wellen in Richtung Land, so verändern sich diese Verhältnisse. Die horizontale Geschwindigkeitskomponente wird in Ihrem Maximum immer größer im Gegensatz zur vertikalen Komponente. Daraus resultieren ebenfalls die immer flacher werdenden Orbitalbahnen der Wasserteilchen. Allein diese Betrachtung der Wasserpartikel lässt darauf schließen, dass unterschiedliche mathematische Formulierungen für die verschiedenen Bereiche notwendig sind. [Le Méhauté 1976] gibt eine Übersicht über die gängigen Wellentheorien und in welchen Bereichen sie Anwendung finden. Für die folgenden Auswertungen wurde die Wellentheorie nach [Stokes 2009] verwendet. Die Ausführung der Formulierung 3. Ordnungen wurden aus [Ausschuß für Küstenschutzwerke 2002] entnommen. Die Stokische Theorie findet hier Anwendung, weil die Feldmessdaten nach der Definition im sogenannten Übergangsbereich aufgenommen wurden. Nach [Center 1984] wird mit Hilfe des sogenannten URSELL-Diagramms der Anwendungsbereich der Wellentheorie bestimmt. Die Grundgleichungen der Stokischen Wellentheorie sind gegeben durch die Beschreibung der Wellengeschwindigkeit

$$c = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh) \cdot \left[1 + k^2 a^2 \frac{8 + \cosh(4kh)}{8 \sinh^4(kh)} \right]} \quad \text{Gl. (1)}$$

In der k die Wellenzahl, g die Erdbeschleunigung, a die Amplitude und h die Wassertiefe sind.

Aufbau und Umsetzung des Messkonzeptes

Der Wasserkanal am Lehrstuhl für Strömungsmechanik an der Universität Rostock, ist 5 m lang, 0,8 m breit und 1 m hoch. Er wurde so konzipiert, dass sowohl eine gleichmäßige Anströmung, als auch Wellen in ihm erzeugt werden können. Als Wellenerzeuger ist ein Piston-Type Wellengenerator implementiert. In Abbildung V ist das CAD Modell des Versuchstandes abgebildet. Die Wellen werden am rechten Ende des Kanals erzeugt und laufen dann eben durch den Kanal und treffen zwei Meter vor dem Ende des Kanals auf das Messgebiet. Dort ist ein Einsatz für verschiedene poröse Stoffe eingelassen. Dieser Einsatz ist so konzipiert, dass Stoffe mit einer Schichtdicke von 60mm und einer Fläche von einem halben Quadratmeter eingesetzt werden können. Weiterhin kann der Boden im Neigungswinkel variiert werden. Im unteren Teil des Einsatzes befindet sich ein Reservoir, in welches Fluoreszenzmittel gepumpt wird. Dieser Tracer wird verwendet, um mittels Laser Induced fluorescence (LIF) den Ausstrom und die Ausbreitung über dem permeablen Boden zu bestimmen.

Die Messungen erfolgen in einer Ebene die in Strömungsrichtung orientiert ist. Dazu wird der Laserlichtschnitt oberhalb durch die Wasseroberfläche in die Strömung eingekoppelt (siehe Abbildung V). Die Kameras sind orthogonal zum Lichtschnitt ausgerichtet und befinden sich außerhalb des Kanals.

Hinter dem Messgebiet ist ein Wellenabsorber installiert. Dieser ist in der Lage, den energiereichsten Anteil der aufgebrachten Wellen zu absorbieren und die Rückstreuung an der Kanalrückwand zu minimieren.

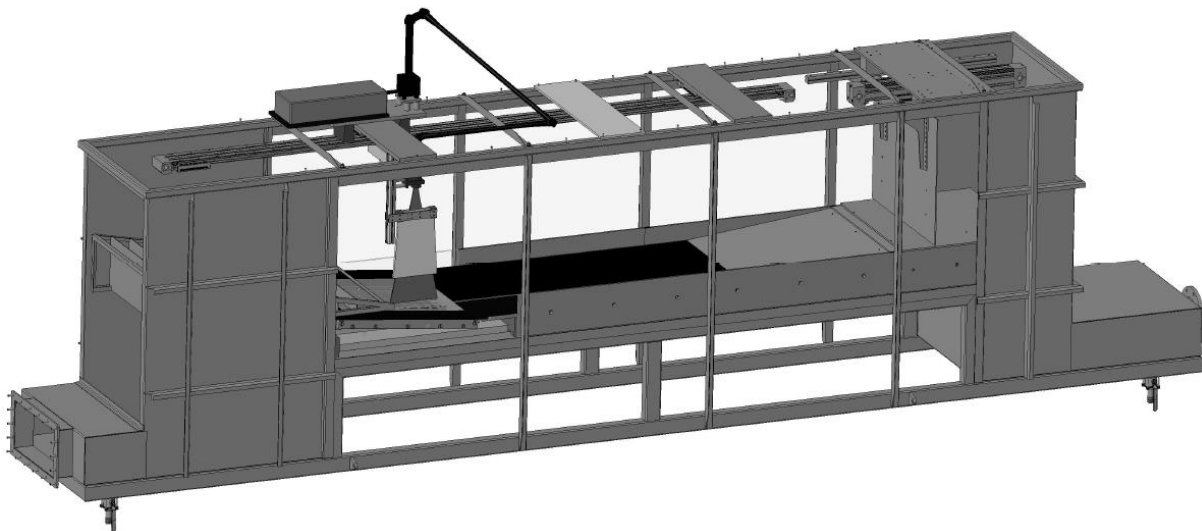


Abbildung V: Versuchskanal am Lehrstuhl Strömungsmechanik

Die Skalierung der Vorgänge erfolgt über das Verhältnis der Wassertiefe zur Wellenlänge. Dieses Verhältnis legt fest welcher Wellentypus vorliegt. Um Übergangswasserwellen zu erreichen, beträgt die Wasserhöhe während der Versuche 0,3 m. Damit ist gleichzeitig eine ausreichende Höhe der Wassersäule vorhanden, um Mischungsvorgänge zu untersuchen.

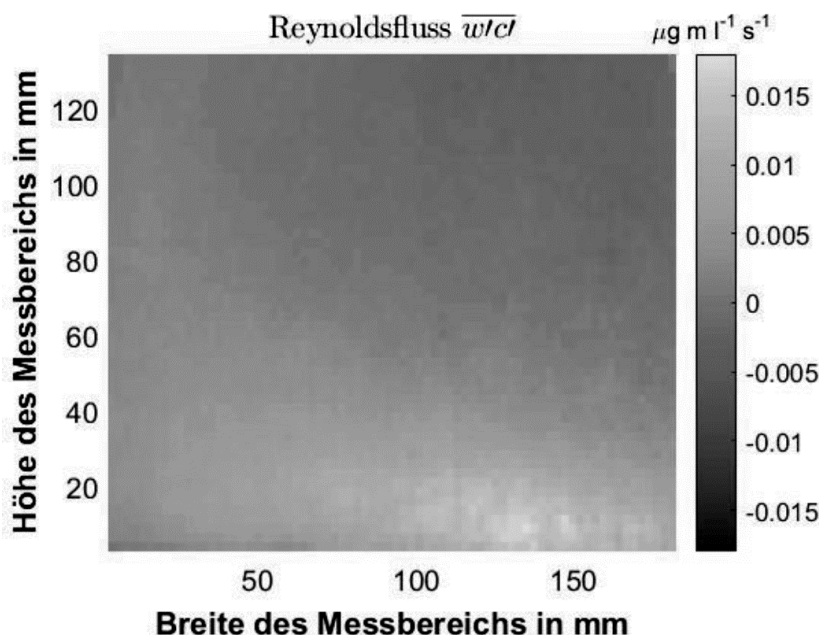
PIV-LIF Untersuchung verschiedener Szenarien

Die Erfassung der Konzentrations- und Geschwindigkeitsfelder erfolgt simultan mittels PIV und LIF Messtechnik. Das Messgebiet hat eine Größe von 132 x 241 mm² und die Doppelbildrate beträgt 7,5Hz. In den Untersuchungen wurden Wellen ausgewählt die auf Feldmessdaten beruhen. Hierzu wurden Acoustic Doppler Messungen vor dem Untersuchungsgebiet über eine halbes Jahr ausgewertet. Als entscheidende Parameter wurden die Wellengeschwindigkeit und die Periodendauer gewählt, die in den Vorversuchen [Karrow 2017] die Tracerausbreitung entscheidend bestimmt hatten. Daher wurden aus den Feldmessdaten die Wellengeschwindigkeiten mit Hilfe der Stokschen Wellentheorie 3. Ordnung (siehe Grundlagen der Wellentheorie) die maximalen Geschwindigkeiten 5 cm über dem Boden berechnet. Aus der statistischen Verteilung der Geschwindigkeit und der Periode wurden drei verschiedene Wellenszenarien festgelegt.

Tabelle A: Übersicht Wellenszenarien der Untersuchungsparameter

Szenario	1. ruhiges Szenario	2. mittleres Szenario	3. stürmisches Szenario
Periode	1,99s	2,52s	3,3s
Orbitalgeschwindigkeit(max)	0,05m/s	0,1m/s	0,25m/s
Wellentyp	Übergangswelle	Übergangswelle	Übergangswelle
Wassertiefe/Lambda	0,09	0,05	0,07

Mit den oben genannten Wellenszenarien wurden folgende sechs Messreihen durchgeführt. Dabei wurden zwei verschiedene poröse Medien eingesetzt. Zum einen eine Filtermatte mit einer Porosität von 10 PPI und zum anderen eine Filtermatte mit einer Porosität von 45 PPI. Diese Messreihen wurden hinsichtlich ihres Mischungsverhaltens und ihrer turbulenten Aspekte analysiert. So wurden für alle Szenarien die Reynoldsflüsse ermittelt. Sowohl in horizontaler Richtung ($\overline{u'c'}$) als auch in vertikaler Richtung ($\overline{w'c'}$). In Abbildung VI der vertikale Reynoldsfluss für den Versuch mit mittleren Wellenszenario und dem.



Weiterhin ist in Abbildung VII der dazugehörige horizontale Reynoldsfluss abgebildet. Dieser Vergleich der Reynoldsflüsse steht stellvertretend für alle Messreihen. Es ist grundsätzlich zu beobachten, dass der horizontale Reynoldsfluss wesentlich größer ist als der vertikale, als auch das sich Ihre Vorzeichen unterscheiden. Der Vorzeichenunterschied beruht darauf, dass bei dem vorliegenden positivem Geschwindigkeitsgradienten $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ aus einer posi-

Abbildung VI: vertikaler Reynoldsfluss des mittleren Wellenszenarios

ven Schwankung w' eine negative Schwankung u' und aus einer negativen Schwankung w' eine positive Schwankung u' resultiert.

Die Geschwindigkeitsschwankungen stehen im unmittelbaren Zusammenhang. Die Stärke der Reynoldsflüsse ist wiederum von der Konzentrationsschwankung, als auch von der Geschwindigkeit abhängig. Da die horizontale Geschwindigkeitskomponente der Wellen im Übergangsbereich im Maximum um ein vielfaches größer ist, als das Maximum der vertikalen Geschwindigkeitskomponente, unterscheiden sich auch die horizontalen Reynoldsflüsse von den vertikalen um ein

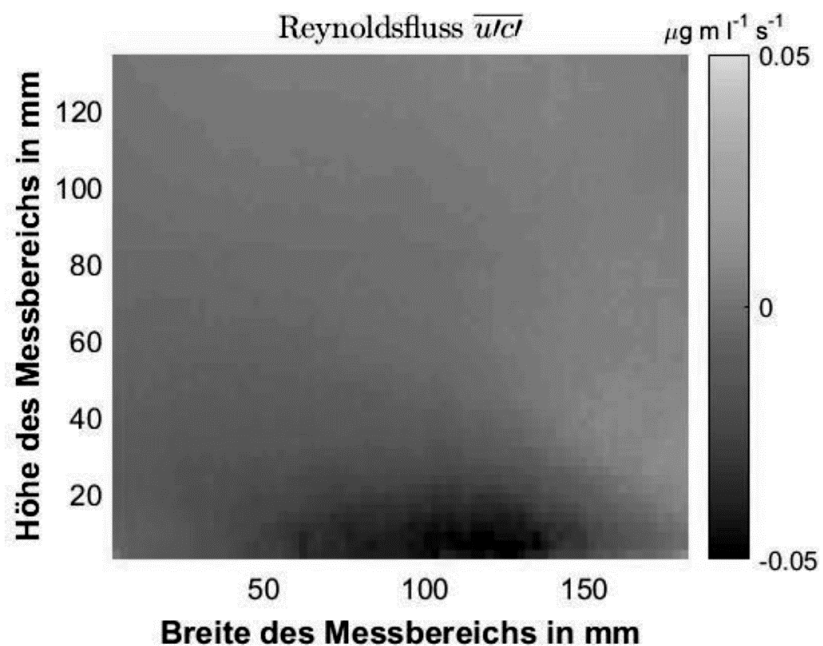


Abbildung VII: horizontaler Reynoldsfluss des mittleren Wellenszenarios

Vielfaches. Die oben aufgezeigten Reynoldsflüsse unterscheiden sich für die verschiedenen Wellenszenarios lediglich in ihrer Intensität und Ausprägung. So ist zu beobachten, dass für das ruhige Wellenszenario kleinere Flussraten erzeugt werden und die vertikale Ausprägung kleiner ist als bei dem mittleren und dem stürmischen Szenario.

Des Weiteren wurden die Mischungsweglängen der turbulenten Diffusion mit der 1. Prandtlschen Mischungsweg-Formel

$$\overline{u'w'} = l_m^2 \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right) \left| \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right| \quad \text{Gl. (0.2)}$$

bestimmt.

Zur Bestimmung des vertikalen Transports werden der Reynoldsfluss und die Konzentration zunächst zeitlich und dann horizontal über die Messebene gemittelt. Zur Bestimmung des Konzentrationsgradienten wird nach der Mittelung für jeden vertikalen Pixel ein Vorwärtsdifferenzenquotient bestimmt, sodass der Konzentrationsanstieg in z-Richtung abhängig von der Messtiefe vorliegt. Zur Bestimmung des Geschwindigkeitsgradienten $\frac{\partial \bar{u}}{\partial z}$ werden die Geschwindigkeiten jedes Messpunktes über die Periodendauer einer Phase zugeordnet. Danach wird für jeden Pixel in jeder Phase der zeitliche Mittelwert bestimmt. Nach einer zusätzlichen horizontalen Mittelung wird, wie bereits bei der Konzentration, der Geschwindigkeitsgradient für jede Phase einzeln durch einen Vorwärtsdifferenzenquotienten bestimmt. Abschließend wird über die Phasen der quadratische Mittelwert gebildet. Somit ist es möglich, für jedes Versuchsszenario die Mischungsweglänge in Abhängigkeit zum Bodenabstand zu berechnen. Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass der relative Verlauf der Mischungsweglänge unabhängig von den verwendeten Wellenprofilen und porösen Medien ist. Lediglich in den Absolutwerten ergeben sich bei den verschiedenen Szenarios Unterschiede.

Zusammenfassung und Ausblick

In den Experimenten wurde das Mischungsverhalten von einem Farbstoff unter drei verschiedenen Wellenszenarien und über zwei verschiedenen porösen Stoffen untersucht. Es wurden die Reynoldsflüsse und die Mischungsweglängen berechnet und analysiert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Mischungsweglängen mit stärkeren Wellenbewegungen ansteigen. Sie ändern sich geringfügig für jedes Szenario, sind aber in Ihrem Verlauf bezogen auf den Wandabstand ähnlich.

In den weiterführenden Experimenten werden die hier gezeigten Ergebnisse durch Untersuchungen mit verschiedenen Hangneigungen ergänzt und verglichen.

Dankesworte

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Forschung im Rahmen des Graduiertenkollegs 2000 Baltic Transcoast.

Literatur

- AUSSCHUß FÜR KÜSTENSCHUTZWERKE. 2002. *EAK 2002. Empfehlungen für die Ausführung von Küstenschutzwerken*. Die Küste 65.2002. Westholsteinische Verl.-Anst. Boyens, Heide.
- BECK, A.J., KELLUM, A.A., LUEK, J.L., AND COCHRAN, M.A. 2016. Chemical Flux Associated with Spatially and Temporally Variable Submarine Groundwater Discharge, and Chemical Modification in the Subterranean Estuary at Gloucester Point, VA (USA). *Estuaries and Coasts* 39, 1, 1–12.
- BURNETT, W.C., AGGARWAL, P.K., AURELI, A., BOKUNIEWICZ, H., CABLE, J.E., CHARETTE, M.A., KONTAR, E., KRUPA, S., KULKARNI, K.M., LOVELESS, A., MOORE, W.S., OBERDORFER, J.A., OLIVEIRA, J., OZYURT, N., POVINEC, P., PRIVITERA, A.M.G., RAJAR, R., RAMESSUR, R.T., SCHOLTEN, J., STIEGLITZ, T., TANIGUCHI, M., AND TURNER, J.V. 2006. Quantifying submarine groundwater discharge in the coastal zone via multiple methods. *The Science of the total environment* 367, 2-3, 498–543.
- CENTER, C.E.R. 1984. *Shore Protection Manual*, Vicksburg, Mississippi 39180.
- IOC, SCOR, AND IAEA. 2004. *Submarine groundwater discharge. Management implications, measurements and effects*. Series on groundwater / IHP-VI 5. UNESCO, Paris.
- KAROW, N. 2017. *Experimentelle Strömungstechnik. 25. Fachtagung, 5.-7. September 2017, Karlsruhe*. PIV-LIF Untersuchung des Grundwassereintrags in marinen Bodengrenzschichten, N. Karow. Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie, Karlsruhe.
- LE MÉHAUTÉ, B. 1976. *An introduction to hydrodynamics and water waves*. Springer.
- LEOTE, C., IBÁÑEZ, J.S., AND ROCHA, C. 2008. Submarine Groundwater Discharge as a nitrogen source to the Ria Formosa studied with seepage meters. *Biogeochemistry* 88, 2, 185–194.
- MOORE, W.S. 2010. The effect of submarine groundwater discharge on the ocean. *Annual review of marine science* 2, 59–88.
- RAPAGLIA, J., KOUKOULAS, S., ZAGGIA, L., LICHTER, M., MANFÉ, G., AND VAFEIDIS, A.T. 2012. Quantification of submarine groundwater discharge and optimal radium sampling distribution in the Lesina Lagoon, Italy. *Journal of Marine Systems* 91, 1, 11–19.
- ROBINSON, C., LI, L., AND BARRY, D.A. 2007. Effect of tidal forcing on a subterranean estuary. *Advances in Water Resources* 30, 4, 851–865.
- Schade, personal communication.
- SLOMP, C.P., AND VAN CAPPELLEN, P. 2004. Nutrient inputs to the coastal ocean through submarine groundwater discharge. Controls and potential impact. *Journal of Hydrology* 295, 1-4, 64–86.
- STOKES, G.G. 2009. On the Theory of Oscillatory Waves. In *Mathematical and physical papers. Volume 1*, G. G. STOKES, Ed. Cambridge University Press, Cambridge, 197–229.
- TANIGUCHI, M., ISHITOBI, T., AND SHIMADA, J. 2006. Dynamics of submarine groundwater discharge and freshwater-seawater interface. *J. Geophys. Res.* 111, C1.
- ULLMAN, W.J., CHANG, B., MILLER, D.C., AND MADSEN, J.A. 2003. Groundwater mixing, nutrient diagenesis, and discharges across a sandy beachface, Cape Henlopen, Delaware (USA). *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 57, 3, 539–552.