

PIV-LIF Untersuchung des Grundwassereintrags in marinen Bodengrenzschichten

PIV-LIF Experiments on the ground water discharge in oceanic bottom boundary layers

Nils Karow, Tobias Bestier, 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 Nährstoff- und Sauerstoffeintrag in die Ostsee ist eines der wichtigsten Mechanismen für das Überleben der hiesigen Pflanzen und Tierwelt sowie des gesamten Ökosystems. Der Einstrom von Salzwasser aus der Nordsee und dessen Mischung ist hinreichend bekannt. Eine andere, sehr bedeutende ([Burnett et al. 2006], [Leote et al. 2008], [Moore 2010], [Burnett et al. 2001], [Robinson et al. 2007]) Quelle, ist der Nährstoffeintrag durch Grundwasser. Dieser Submarine Grundwassereintrag (SGD) ist in vielen Gebieten auf der Welt ([Beck et al. 2016], [Leote et al. 2008],[Taniguchi et al. 2006], [Rapaglia et al. 2012]) nachgewiesen und stellt nach ([Slomp and van Cappellen 2004]) einen entscheidenden wesentlichen Eintrag von Spurenstoffen in unsere Gewässer dar. Dieser Stoffaustausch, speziell zwischen Ostsee und Grundwasser wird im DFG Graduiertenkolleg Baltic Transcoast in verschiedenen Projekten untersucht. 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.

Die Versuche werden in einem Wasserkanal mit Hilfe laseroptischer Messmethoden durchgeführt. In diesem Kanal werden Flachwasserwellen mit Hilfe eines Piston-Type Wellengenerators erzeugt. Diese laufen in der Messebene über ein permeables Testmedium, welches den Ostseeboden nachbildet. Unterhalb dieses Mediums wird ein 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 ersten Untersuchungen wurde gezeigt, dass für ebenen, glatten Boden die vertikale Durchmischung von der Diffusionsgeschwindigkeit dominiert wird während die horizontale Mischung mit den aufgebrachten Wellenparametern korreliert. Weiterhin wurde festgestellt, dass ein Großteil der Mischung bereits im porösen Medium selbst, der Transport dagegen im Wasserkörper stattfindet.

Einleitung

Die Ermittlung des Ausbreitungsverhaltens von Nährstoffen unter Welleneinfluss im küstennahen Bereich ist ein kompliziertes Themengebiet, welches in der Natur nicht detailliert untersucht werden kann. Aus diesem Grund wird das Mischungs- und Ausbreitungsverhalten spezifischer Tracer in einem Laborexperiment umgesetzt. Das Experiment ist in einem Wasserkanal an der Universität Rostock am Lehrstuhl für Strömungsmechanik aufgebaut. Hier wird an einem variablen Modellboden ein Tracer eingebracht. Dieser Tracer wird unter Wellenbewegung angeströmt und erfährt so einen Energieeintrag. Dieser Energieeintrag wird durch eine Ausbreitung des Stoffes in der Wassersäule charakterisiert. Das Verhalten wird durch ein PIV-LIF System aufgenommen und anschließend ausgewertet.

Grundlagen Wellentheorie

Die Wellentheorie ist ein wesentlicher Bestandteil der Untersuchungen, um die experimentell ermittelten Werte auswerten zu können.

Eine Ozeanwelle ist eine periodische Auslenkung der Wasseroberfläche und dem damit verbundenen Massentransport. Ihre wesentlichen Charakteristika lassen sich mit den folgenden Parametern ausreichend beschreiben. Die Periodendauer T gibt die Zeit an, in welcher sich eine definierte Phasenlage wiederholt. Die Phase ϕ gibt die Phasenlage der Welle zu einem bestimmten Zeitpunkt t an. Die Auslenkung A gibt die Höhendifferenz der Wasseroberfläche zur Nulllage an. Sie wird auch als Wellenhöhe bezeichnet.

Wird während der Wellenbewegung ein Wasserteilchen betrachtet, so bewegt es sich unter einer Welle auf seinen sogenannten Orbitalbahnen. Die Form der Orbitale wird durch den Wellentypus bestimmt (siehe Abbildung 1). Ein Teilchen auf seiner Orbitalbahn bewegt sich mit seiner Phasengeschwindigkeit auf dieser. Die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit ist für den Massentransport verantwortlich und steht im Allgemeinen nicht in linearem Zusammenhang mit der Phasengeschwindigkeit.

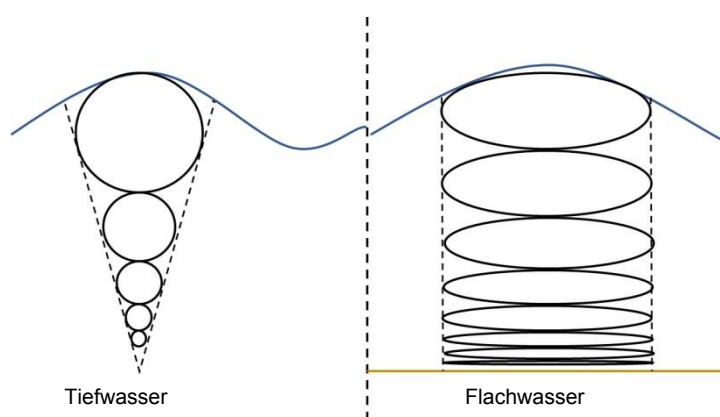


Abbildung 1: Orbitaldarstellung der Wellen

Die Orbitalbahnen der Wasserteilchen hängen vom Typus der Wellen ab. Grundsätzlich werden 3 Wellentypen unterschieden, Flachwasser, Tiefwasser und Übergangswellen. Abbildung 1 zeigt die wesentlichen Unterschiede zwischen Tief- und Flachwasserwellen. Die Orbitale bilden unter Tiefwasserwellen im Wesentlichen ideale Kreise. Im Verlauf der Wassersäule zum Meeresboden hin werden diese Kreisbahnen immer kleiner, bis ab einem bestimmten

Punkt keine Bewegung der Wasserteilchen aufgrund der Oberflächenwellen mehr stattfindet. Im Flachwasserbereich stellen sich andere Verhältnisse ein. Hier bestehen die Orbitale im Wesentlichen aus elliptischen Bahnen. Es findet hier hauptsächlich eine Bewegung in horizontale Richtung statt. Wird hier wieder der Verlauf der Orbitale hin zum Meeresboden betrachtet, so ist ersichtlich, dass die Ausdehnung der Orbitale nur geringfügig abnimmt, aber ihre vertikale Komponente immer kleiner wird. Im idealen Fall, findet am Meeresboden nur noch eine horizontale Bewegung der Wasserteilchen statt.

Es gibt eine Vielzahl an Wellentheorien, die viele verschiedene Spezialfälle abdecken. Fast alle diese Theorien beruhen auf der Potentialtheorie. Hier findet zur ersten Abschätzung spezifischer Parameter die lineare Wellentheorie nach [Airy 1845] Anwendung.

Submarine Groundwater Discharge

Der Submarine Grundwasseraustritt (SGD) ist ein Sammelbegriff für verschiedene Formen des Grundwasseraustritts im Küstenbereich. Es werden grundsätzlich zwei verschiedenen SGD-Typen unterschieden. Dabei handelt es sich zum einen um die Seewasser Rezirkulation (seawater recirculation SGD) und zum anderen um das terrestrische Frischwasser (terrestrial freshwater SGD). [Robinson et al. 2007] unterscheidet zwei weitere Formen des Submarinen Grundwassers, die sich aus den beiden Hauptformen zusammensetzen (siehe Abbildung 2).

SGD ist ein Prozess der von vielen Einflussfaktoren abhängig ist. Den größten Einfluss auf den Austritt haben der hydraulische Gradient vom Land zur Seeseite, die vorherrschenden Strömungen im Küstenbereich, die Ausprägung der Wellen im Küstenbereich und Zirkulationen die auf Dichtegradienten beruhen.

Das SGD bringt nicht nur Frischwassereinträge mit in den Küstenbereich, sondern transportiert ebenfalls Nährstoffe und Abfallstoffe mit sich. Es finden sich in [Moore 2010], [Slomp and van Cappellen 2004], [Ullman et al. 2003], [IOC et al. 2004], [Burnett et al. 2001] und vielen anderen, dass das SGD maßgeblich an der Verschmutzung der Küstenbereiche beteiligt ist. Demnach werden Verunreinigungen und Nährstoffe aus der Landwirtschaft und Industrie, welche ins Grundwasser gelangen, mit dem Grundwasser in den Nahküstenbereich transportiert. In den Laborexperimenten soll untersucht werden, wie und unter welchen Bedingungen sich diese Nährstoffe oder Verunreinigungen unter turbulenten Effekten der Wellenbewegung in der Wassersäule verteilt werden.

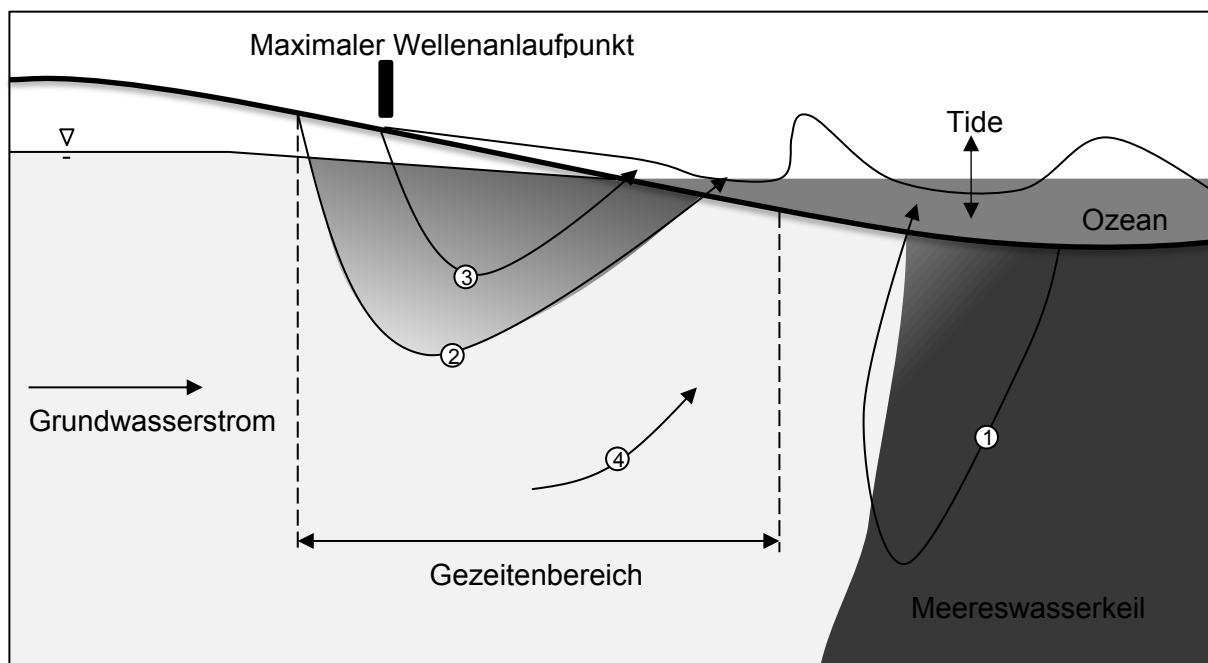


Abbildung 2: SGD Formen nach [Robinson et al. 2007]

Marine Bodengrenzschichten

Die Beschaffenheit des Meeresbodens beeinflusst den Stofftransport und die Strömungsvorgänge in den angrenzenden Schichten maßgeblich. [Rusch et al. 2000] führt mehrere Quellen auf, die Aussagen darüber machen, dass der advective Stofftransport über die Sediment-Wasser-Grenzfläche maßgeblich am Nährstoffaustausch und Suspension kleiner Sedimentpartikel verantwortlich ist. Dieser Übergangsbereich, wird nach ([Thomsen]) auch als „Benthic Boundary Layer“ bezeichnet. Nach [Lorke et al. 2003] findet speziell der Sauerstoffaustausch vorrangig in dieser Bodengrenzschicht statt.

Die Ausbildung dieser Grenzschicht ist nach [Nielsen 1994] von der Bodenbeschaffenheit und der vorliegenden Strömung abhängig. Die Rauigkeit des Bodens ist maßgeblich für die Grenzschichtdicke verantwortlich. So ist die Grenzschicht für glatte und ebene sandige Flächen sehr dünn. Weiterhin sagt [Nielsen 1994], dass eine welleninduzierte Grenzschicht wesentlich dünner ist, als eine rein strömungsinduzierte. Dadurch ist der Einfluss der Welleninduzierten Strömung auf das Sediment wesentlich größer als der Einfluss der reinen gleichmäßigen Anströmung.

In Untersuchungen zum Fließverhalten über poröse Medien haben ([Gupte and Advani 1997; Alazmi and Vafai 2001; Prinos et al. 2003; Agelinchaab et al. 2006; ARTHUR et al. 2009; Morad and Khalili 2009; Keramaris and Pechlivanidis 2015]) festgestellt, dass die Art des porösen Mediums die Strömungsgeschwindigkeit in der Grenzschicht signifikant beeinflussen. Als Parameter werden hier allgemein hin die Porosität, Permeabilität und der volume friction factor genannt. Bei Vergleichen der einzelnen Arbeiten wird klar, dass der volume friction factor die Einflussgröße für die Geschwindigkeitsprofile in der Grenzschicht ist.

Die Beschaffenheit dieser Grenzschicht ist nicht unerheblich für den Stofftransport über und aus dem porösen Medium. Deshalb ist es notwendig, den permeablen Boden dahingehend zu entwickeln, das reale Bedingungen der Oberflächenrauigkeit bzw. des volume friction factors eingehalten werden.

Nach [Brinkman 1949] ist bekannt, dass sich zwischen dem laminaren Strömungsprofil im porösen Medium und dem sich darüber befindlichen Strömungsprofil der überströmenden Wasserschicht, eine Übergangsschicht bildet.

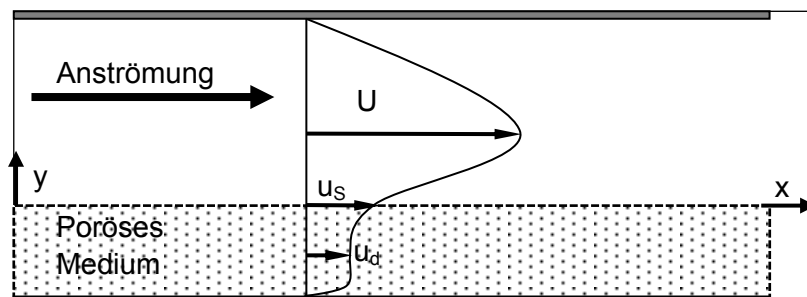


Abbildung 3: Bodengrenzschicht über einem porösen Medium nach [Agelinchaab et al. 2006]

Diese sogenannte Brinkman-Schicht ist diejenige die für das Verhalten von Tracern direkt beim Austritt aus dem porösen Medium verantwortlich ist. In dieser Schicht werden die Tracerpartikel, die sich im porösen Medium laminar verteilen und mischen, auf die Geschwindigkeit der Außenströmung beschleunigt. Dies

kann zu zusätzlichen turbulenten Effekten führen bei der Interaktion mit der vorliegenden Oberflächenbeschaffenheit. In Abbildung 3 ist eine schematische Darstellung des typischen Geschwindigkeitsprofils über einem porösen Medium nach [Agelinchaab et al. 2006] gegeben.

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 4 ist das CAD Modell des Versuchstandes abgebildet. Die Wellen werden am rechten Ende des Kanals erzeugt und laufen dann über eine schräge Ebene 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 platziert ist. Dazu wird der Laserlichtschnitt oberhalb durch die Wasseroberfläche in die Strömung eingekoppelt (siehe Abbildung 4). 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 energie-reichsten Anteil der aufgebrauchten Wellen zu absorbieren und die Rückstreuung an der Kanalrückwand zu minimieren.

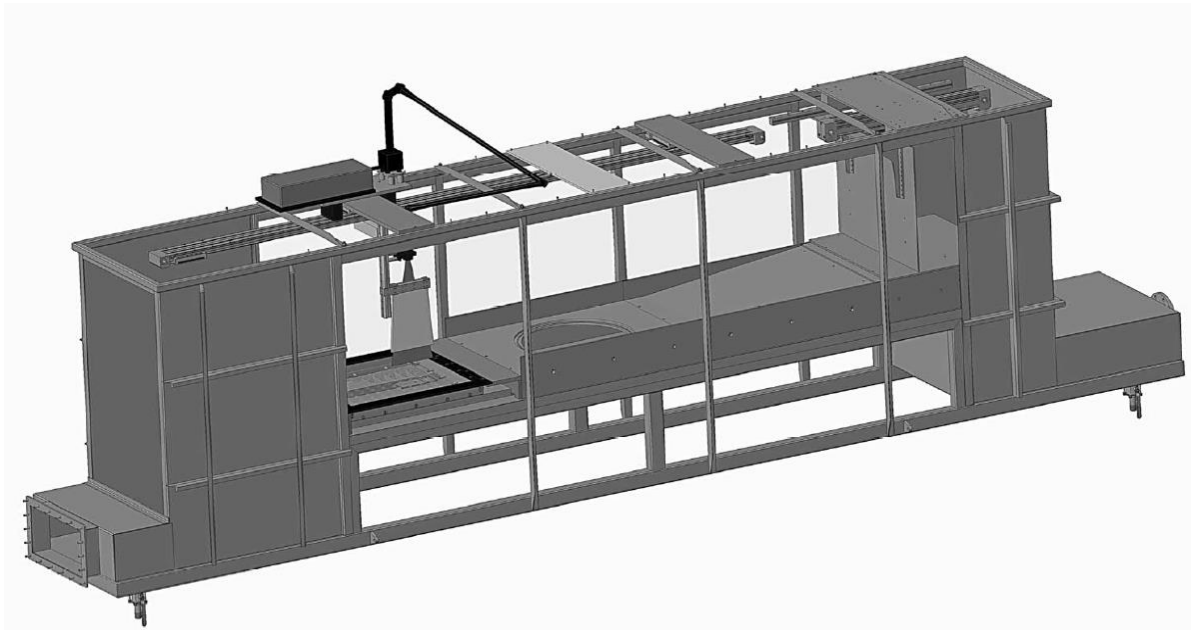


Abbildung 4: Versuchskanal am Lehrstuhl Strömungsmechanik

Die Wasserhöhe während der Versuche beträgt 0,3m Damit ist eine ausreichende Höhe der Wassersäule vorhanden, um Mischungsvorgänge zu untersuchen. Die Skalierung der Vorgänge erfolgt über das Verhältnis der Wassertiefe zur Wellenlänge. Dieses Verhältnis legt fest welcher Wellentypus vorliegt. In den Experimenten wurden Flachwasserwellen untersucht.

Simultane Erfassung der Konzentrations- und Geschwindigkeitsfelder

Die Erfassung der Konzentrations- und Geschwindigkeitsfelder erfolgt simultan mittels PIV und LIF Messtechnik. Das Messgebiet hat eine Größe von 85 x 140 mm² und die Doppelbildrate beträgt 15Hz. In ersten Untersuchungen wurden Wellen mit maximal erreichbaren Parametern erzeugt. Mit Hilfe der durch PIV ermittelten Geschwindigkeitsfelder und der Anwendung der Linearen Wellentheorie [Airy 1845] wurden folgende Parameter der Welle festgelegt:

Tabelle A: Wellenparameter der Versuchswelle

Parameter	Wert
Phasengeschwindigkeit in m/s	0,14
Wellengeschwindigkeit in m/s	1,65
Wellenlänge in m	5,86
Wellenperiode in s	3,54
Orbitaldurchmesser in m	0,16
Wellenhöhe in m	0,08
Wellentyp	Flachwasserwelle

Die Tabelle A zeigt die Auswertung der Wellenparameter für drei verschiedene Messhöhen in der Wassersäule. Der Auswertalgorithmus lieferte nur geringe Abweichungen der Parameter und kann deshalb als gültig angenommen werden. Vergleiche mit händischen Messungen der Wellenhöhe und Wellenlänge zeigten ebenfalls gute Übereinstimmungen. Demnach hat die Welle eine Wellenlänge von 5,8m und eine Periodendauer von 3,5s. Mit der Wellenlänge und der Wassertiefe von 0,3m ergibt sich ein Verhältnis von 0,05. Somit entspricht diese Welle dem Typus einer Flachwasserwelle. Diese Welle wurde für die weiteren PIV/LIF-Untersuchungen verwendet.

Die Messung der Tracerausbreitung erfolgte simultan zu den PIV Messungen. So ist es möglich, die Geschwindigkeits- und Konzentrationsfelder direkt zu korrelieren. Die Messdauer betrug ca. 5 Minuten. Diese Zeit ist ausreichend, um die Ausbreitung der Tracerpartikel unter den geforderten Versuchsbedingungen zu analysieren. In Abbildung 5 sind vier Sequenzen der LIF – Aufnahmen in einem zeitlichen Abstand von 66 s abgebildet.

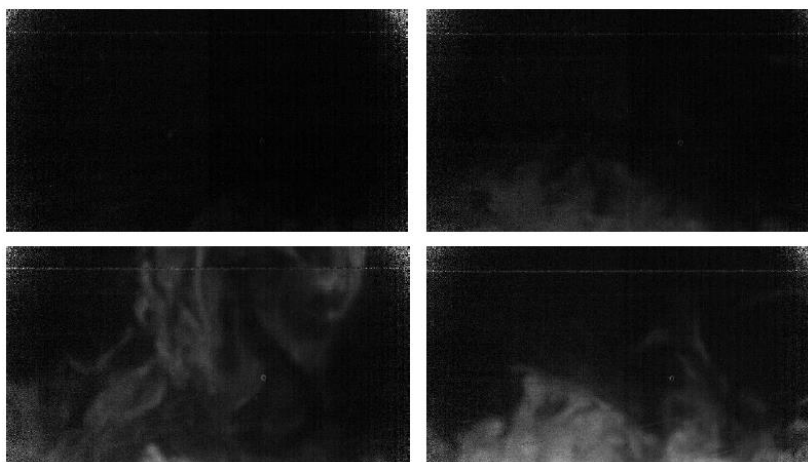


Abbildung 5: Aufnahmesequenzen LIF- Untersuchung

In den Aufnahmen ist deutlich zu erkennen, dass sich der Tracer vorwiegend in horizontaler Richtung ausbreitet und in vertikaler Richtung lediglich kleinere Auswüchse gebildet werden. Diese sind auf turbulente Effekte während des Wellenumschlags zurückzuführen. Weiterhin wird deutlich, dass die Konzentration in der Bodengrenzschicht über die Zeit ansteigt. Zur Visualisierung dieses Effek-

tes wird eine Grenzkonzentration definiert (siehe Abbildung 6).

Diese Grenzkonzentration wurde mit $5\mu\text{g/l}$ festgelegt, weil sich dieser Schwellwert noch ausreichend vom Hintergrundrauschen abhob und so definiert erfasst werden konnte. Mit Hilfe dieser Annahme wurde im Zentrum des erfassten Messgebietes die Ausbreitung der Konzentrationsgrenzfläche über die Zeit und dem Abstand zum permeablen Medium ermittelt. Der daraus resultierende zeitliche Verlauf der Grenzkonzentration über die räumliche Ausbreitung wurde Fourier-Analysiert und dementsprechend gefiltert. Die Filterung führt auf die Kurve die die reine Grenzkonzentrationsausbreitung widerspiegelt und ermöglicht Aussagen zur Ausbreitungsgeschwindigkeit und Verteilung der Tracerpartikel (siehe Abbildung 7).

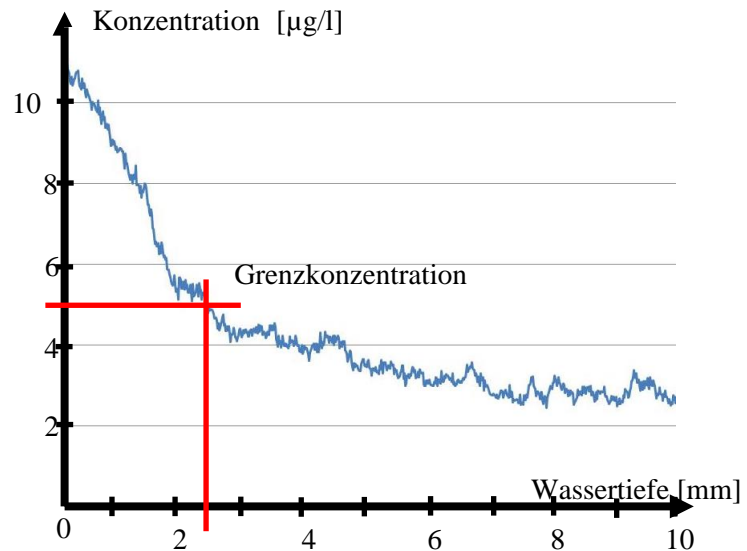


Abbildung 6: Konzentrationsverlauf über die Wassertiefe

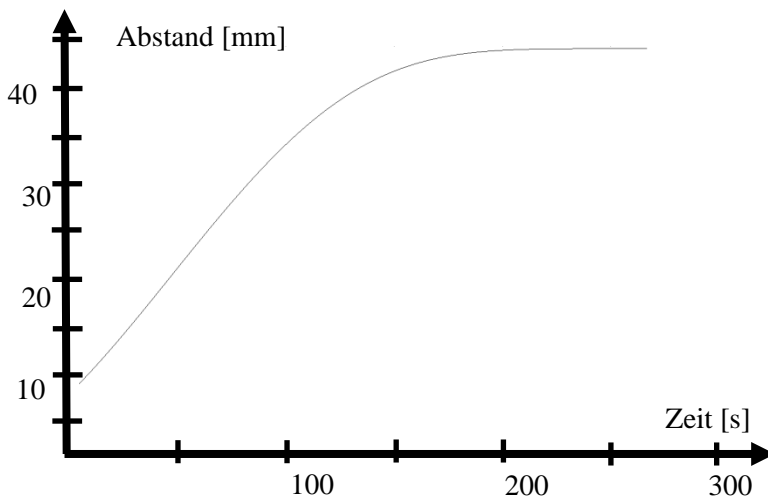


Abbildung 7: zeitliche Ausbreitung der Grenzkonzentrationsfläche

Die zeitliche Ausbreitung zeigt, dass sich in den ersten 150 Sekunden ein starker Anstieg der vertikalen Ausbreitung der Tracer einstellt. Dieser Anstieg erfolgt annähernd linear. Nach dieser Anfangsphase fällt der Anstieg sehr stark ab und es stellt sich Schichtung der Tracer über dem permeablen Medium ein. Die weitere vertikale Ausbreitung erfolgt mit Diffusionsgeschwindigkeit des Tracer Mediums. Weiterhin ist zu beobachten, dass die Konzentration des Tracers weniger als $1/6$ dem entspricht, welches ursprünglich in das poröse Medium eingekoppelt wurde.

Daraus lässt sich schlussfolgern, dass bereits eine sehr starke Durchmischung im permeablen Medium selbst stattfindet.

Zusammenfassung und Ausblick

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, dass der entwickelte Messaufbau in der Lage ist, das Mischungs- und Ausbreitungsverhalten von Tracerstoffen über permeablen Medien zu untersuchen. Die Auswertalgorithmen die für die PIV Daten entwickelt wurden sind in Kombination mit der Linearen Wellentheorie in der Lage, die Wellenparameter ausreichend genau zu bestimmen. Mit Hilfe der LIF Technik wurden erste Versuche über permeablen Testmedien durchgeführt und die Ausbreitung einer Grenzkonzentration über die Zeit ermittelt. Diese Untersuchungen haben gezeigt, dass sich Tracer im nahen Bodenbereich schnell vertikal bis zu einer Grenzdistanz über dem Boden ausbreiten und sich die vertikale Ausbreitungsgeschwindigkeit dann auf die Diffusionsgeschwindigkeit reduziert. In folgenden Untersuchungen sollen verschiedene poröse Stoffe unter verschiedenen Wellenparametern untersucht werden. Weiterhin wird der Anlaufwinkel der Wellen auf das poröse Medium variiert.

Dankesworte

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

Literatur

- Airy, G.B. (1845).** On tides and waves: Encyclopaedia Metropolitana, vol. 5 (mixed sciences), London, pp. 241-396.
- 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.
- BRINKMAN, H.C. 1949.** A calculation of the viscous force exerted by a flowing fluid on a dense swarm of particles. *Appl. Sci. Res.* 1, 1, 27–34.
- 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.
- BURNETT, W.C., TANIGUCHI, M., AND OBERDORFER, J. 2001.** Measurement and significance of the direct discharge of groundwater into the coastal zone. *Journal of Sea Research*, 46, 109–116.
- IOC, SCOR, AND IAEA. 2004.** *Submarine groundwater discharge. Management implications, measurements and effects.* Series on groundwater / IHP-VI 5. UNESCO, Paris.
- 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.
- 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.
- 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.