

Turbulenter Transport benthischen Bodengrundwassers über strukturierten Meeresböden

Turbulent transport of benthic submarine ground water over structured seabeds

M. Brede, L. Kandler, S. Grundmann

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

Grundwasseraustritt, Meeresboden, PIV, LIF, turbulenter Transport
submarine groundwater discharge, seabed, PIV, LIF, turbulent Transport

Abstract

Der Grundwasseraustritt am Meeresboden in der Küstenzone ist ein weit verbreitetes Phänomen. Er bringt zusammen mit einer Veränderung des Salzgehaltes auch eine Vielfalt anorganischer und organischer Substanzen aus dem Sediment in die Wassersäule. Verschiedene Bodenformen, Wellen- und Strömungsbedingungen sowie Bewuchs bewirken einen unterschiedlichen Transport der Substanzen durch die Bodengrenzschicht. In unserem Laborexperiment werden die beim Austritt von mit Tracer markiertem Wasser zu beobachtenden Strömungsphänomene und turbulenten Transportgrößen an verschiedenen gestalteten Bodenstrukturen unter Welleneinfluss quantitativ mit Hilfe von PIV (Particle Image Velocimetry für das Geschwindigkeitsfeld) und LIF (Laser Induced Fluorescence für das Konzentrationsfeld) erfasst.

Wir zeigen Messergebnisse für die Strömungsstrukturen unter Welleneinfluss über Meeresböden, die realen Rippeltopografien entsprechen. Dazu wurden die Turbulenzeigenschaften der Strömung, die Ausbreitung des skalaren Tracers und die turbulente Mischung quantitativ erfasst. Aus diesen Größen lässt sich sowohl auf die Ausbreitungsmechanismen in der Bodengrenzschicht schließen, als auch der turbulente Transport in der Bodengrenzschicht unter verschiedenen Bedingungen quantifizieren. Grundsätzlich können die Ergebnisse für symmetrische Rippel bestätigt werden: Der vertikale Transport ist stark vom Wellenszenario abhängig. Für stürmische Bedingungen ist der Transport wesentlich größer als für ruhige Verhältnisse. Die Verteilung des Reynoldsflusses über dem asymmetrischen Rippelboden zeigt zusätzlich die starke Zunahme des vertikalen Transports speziell für die steilere Rippelseite und in den Phasen mit erfolgter Ablösung.

Einleitung

Betrachtet man weltweit das Flachmeer über dem Kontinentalsockel, dann sind 40% der Böden mit Sand bedeckt (Hall 2002). Diese sind hochgradig durchlässig und bieten so eine permeable Sediment-Wasser Grenzfläche. Diese ist somit durchlässig für einen Wasseraustausch sowohl von Meerwasser als auch für den Einstrom von Bodengrundwasser. Mit dem sogenannten submarinen Grundwassereinstrom (SGD) gelangen Substanzen des Grundwassers (Nährstoffe, Spurenstoffe, Verunreinigungen, Stoffwechselprodukte benthischer Organismen) ins Meer. Dieser Zufluss ist nicht zu vernachlässigen. In aktuellen Untersuchungen erscheint die submarine Bodenfläche signifikant neben den Gewässerzuflüssen hinsichtlich des Eintrags von Nährstoffen, Kohlenstoff, Metallen (Taniguchi et al. 2019).

Am Meeresboden wird die Freisetzung und Verteilung der eingetragenen Stoffe wesentlich von der Bodentopografie und den Strömungsbedingungen beeinflusst (Santos et al. 2011). Im Falle der Sandböden treten verschiedene Rippelformen und Größen auf. Dort findet eine Durchströmung mit Grundwasser aus dem Boden in die Wassersäule gleichzeitig mit einer Durchströmung von Meerwasser aus der und in die Wassersäule statt. Die Freisetzung von Substanzen aus dem Bodengrundwasser wird nun durch diese Strömungsprozesse beeinflusst. In Ruhe erfolgt eine gleichmäßige Freisetzung, unter stürmischen Bedingungen nimmt der welleninduzierte Druckwechsel am Boden zu, der wie ein Pumpvorgang wirkt. Dieser konnte von Huettel (1996) in Farbverlaufsexperimenten im Sandboden verfolgt werden. Das Eindringen des Meerwassers erfolgt dabei im Rippeltal, der Wiederaustritt an der Rippelspitze, beides korrespondiert mit einem Druckmaximum im Tal und einem Druckminimum an der Spitze (Precht 2004). In LDA (Laser Doppler Anemometrie, Hare 2004), PIV (Yuan und Wang 2019) und ADV (Akustik Doppler Velocimetrie, Malarkey 2015) Messungen konnte der Einfluss der verzögerten bzw. beschleunigten Strömung in diesen Bereichen nachweisen werden. Die quantitative Betrachtung des Stofftransportes wird aber erst möglich, wenn Geschwindigkeitsfeld- und Konzentrationsfeldmessungen kombiniert werden. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Korrelation vertikaler Geschwindigkeitsfluktuation w' mit der Fluktuation c' einer Tracersubstanz. Diese Größe ergibt als $w'c'$ den turbulenten Reynoldsfluss, der wiederum mit Hilfe der Mischungswegtheorie mit dem vertikalen Transport der Tracersubstanz verbunden werden kann.

Experimenteller Aufbau

Die gezeigten Experimente wurden im Wellenkanal des Lehrstuhls Strömungsmechanik der Universität Rostock durchgeführt. Der zuvor mit geschichteten Strömungen betriebene Kanal wurde von Karow (2017, 2019) für den Wellenbetrieb eingerichtet. Die Messstrecke ist 4 m lang bei einer Tiefe von 1 m und 0,8 m Breite. Bei Wellenbetrieb wird ein Ruhewasserstand von 30 cm eingestellt. Der Kanal enthält in der aktuellen Anordnung einen Wellengenerator mit ebenem, linear angetriebenem Schubpanel und am anderen Ende einen Plattenstapel als Wellenabsorber, siehe Abbildung 1.

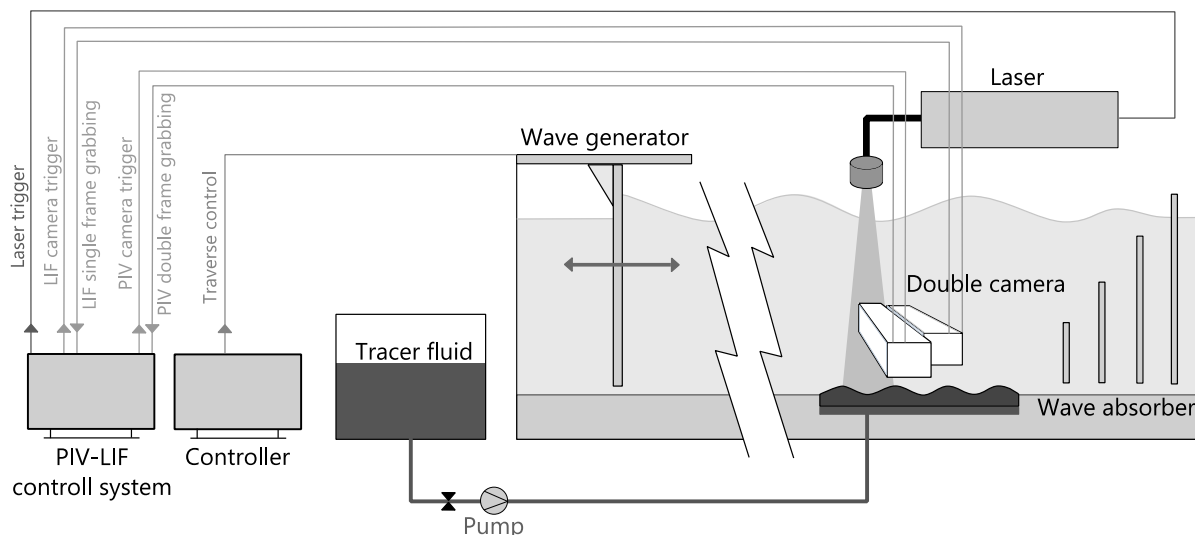


Abbildung 1: Schema des experimentellen Aufbaus im Wellentank mit permeablem Boden und PIV-LIF-System

Für die aktuellen Versuche wurde der Kanal auf einer Fläche von 0,75 m x 0,75 m mit einem austauschbaren, permeablen Bodensegment ausgestattet. Diese Segmente werden mit frei wählbaren Oberflächenkonturen aus offenporigem Schaumstoff hergestellt. Von der Unter-

seite wird flächig gleichmäßig verteilt eine wässrige Farblösung zugeführt. Der darin enthaltene Farbstoff Rhodamin 6G (Sigma-Aldrich®) erzeugt eine starke orange Fluoreszenz um 590 nm Wellenlänge (Yarborough 1974) bei Beleuchtung mit grünem Laserlicht (532 nm). Der Zufluss an Farbstoff ist dem Austritt von Grundwasser am Meeresboden der Ostseeküste nachgebildet und beträgt ca. 0,96 l/min. Der Lichtschnitt wird von einem Litron Nd:YAG Laser bei 532 nm Wellenlänge durch einen Lichtarm und eine Zylinderlinsenoptik erzeugt. Der Schnitt wird durch die Wasseroberfläche durch einen Plexiglaskörper eingekoppelt und ist strömungsparallel angeordnet, die Kamerabeobachtung erfolgt senkrecht dazu.

Zur Messung der Geschwindigkeits- und Konzentrationsfelder wird ein Aufbau zur simultanen PIV und LIF Messung desselben Bildausschnitts verwendet. Das von einem Strahlteiler weitergeleitete Bild wird nach einem Interferenzfilter von einer interline CCD PIV Kamera Dantec Flowsense 2M aufgenommen. Die Bilder weisen eine Größe von 1600x1200 Pixeln auf, bei einer Pixelkantenlänge von 7,5 μm und einer Doppelbildrate von 15 Hz. Die baugleiche LIF-Kamera erhält das Bild nach einem Bandpass für das Fluoreszenzlicht und nimmt synchron Einzelbilder auf. Je Messung wurden 10.000 PIV-LIF-Bildpaare aufgezeichnet. Die PIV Doppelbilder wurden mit Hilfe der Software Dantec Dynamic Studio korrelationsbasiert mit adaptiver Abtastfleckenlänge mit Zielgröße 32 Pixel x 32 Pixel bei 50% Überlappung analysiert. Aus den LIF Bildern wird mit Hilfe der Kalibrierung das Konzentrationsfeld des Farbstoffs bestimmt. Die weitere Auswertung erlaubt neben der Betrachtung der Einzelbilder sowohl eine zeitliche als auch eine Phasenmittelung an beliebigen Stellen der Wellenphase. Durch die synchrone PIV-LIF Aufnahme ist es möglich, zusätzlich zu den Korrelationsgrößen u'^2 , w'^2 und $u'w'$ auch den horizontalen und den vertikalen Reynoldsfluss zu bestimmen und auch in Phasen der Wellenbewegung zu mitteln, angegeben als $\langle u'c \rangle$ und $\langle w'c \rangle$.

Insgesamt wurden bislang vier Bodenformen bei drei Wellenszenarien untersucht. In den folgenden Abschnitten berichten wir von den Ergebnissen für einen Boden, der von Profilmessungen am Meeresboden vor der Küste von Rostock-Markgrafenheide in zwei Meter Wassertiefe abgeleitet wurde. Zum Untersuchungsgebiet siehe auch Jurasinski et al. (2018). Aus den Messungen entstand durch Mittelung eine natürliche asymmetrische Rippelform. Zum Vergleich werden in Abbildung 4 Ergebnisse zu der ebenfalls untersuchten symmetrischen Rippelform gezeigt. Die Wellenszenarien, hier als „ruhig“ und „stürmisch“ bezeichnet, wurden durch Wahl der Amplituden der Bewegung des Wellengenerators eingestellt, die erzeugte Orbitalbewegung am Boden entspricht der Bewegung der Bodengrenzschicht in einer typischen küstennahen Welle in zwei Metern Wassertiefe.

Ergebnisse

Abbildung 2 zeigt eine ausgewählte Phase der Wellenbewegung für drei gemessenen Größen: Das Geschwindigkeitsvektorfeld, dazu entweder das Konzentrationsfeld (links) oder das Feld der turbulenten kinetischen Energie. Im oberen Teil ist das Ergebnis für das ruhige Wellenszenario wiedergegeben, im unteren Teil für stürmische Bedingungen.

Für ruhige Wellenbedingungen ist im Geschwindigkeitsfeld zu erkennen, dass die Strömung der Kontur folgt. Beim stürmischem Szenario zeigt sich dagegen eine Ablösung an der steilen Seite mit ausgeprägtem Leeseitenwirbel. Die Drehung des Wirbels ist sogar am gezeigten Umkehrpunkt der Außenströmung der hier gezeigten Phase noch voll ausgeprägt.

Im Vergleich zum Geschwindigkeitsfeld sind in der Verteilung der Konzentration die Unterschiede zwischen den Wellenszenarien weniger drastisch. Eine signifikante Erhöhung der Konzentration zeigt sich unter beiden Bedingungen in Bereichen gesteigerter Scherrate. Im stürmischen Szenario erfolgt diese im Wirbel, im ruhigen Szenario durch die Scherung im Grenzschichtbereich an der flacheren Rippelseite. Außerdem ist im ruhigen Szenario mehr vertikale Diffusion vom Tracer zu erkennen bei einer gleichmäßigen Verteilung am Boden.

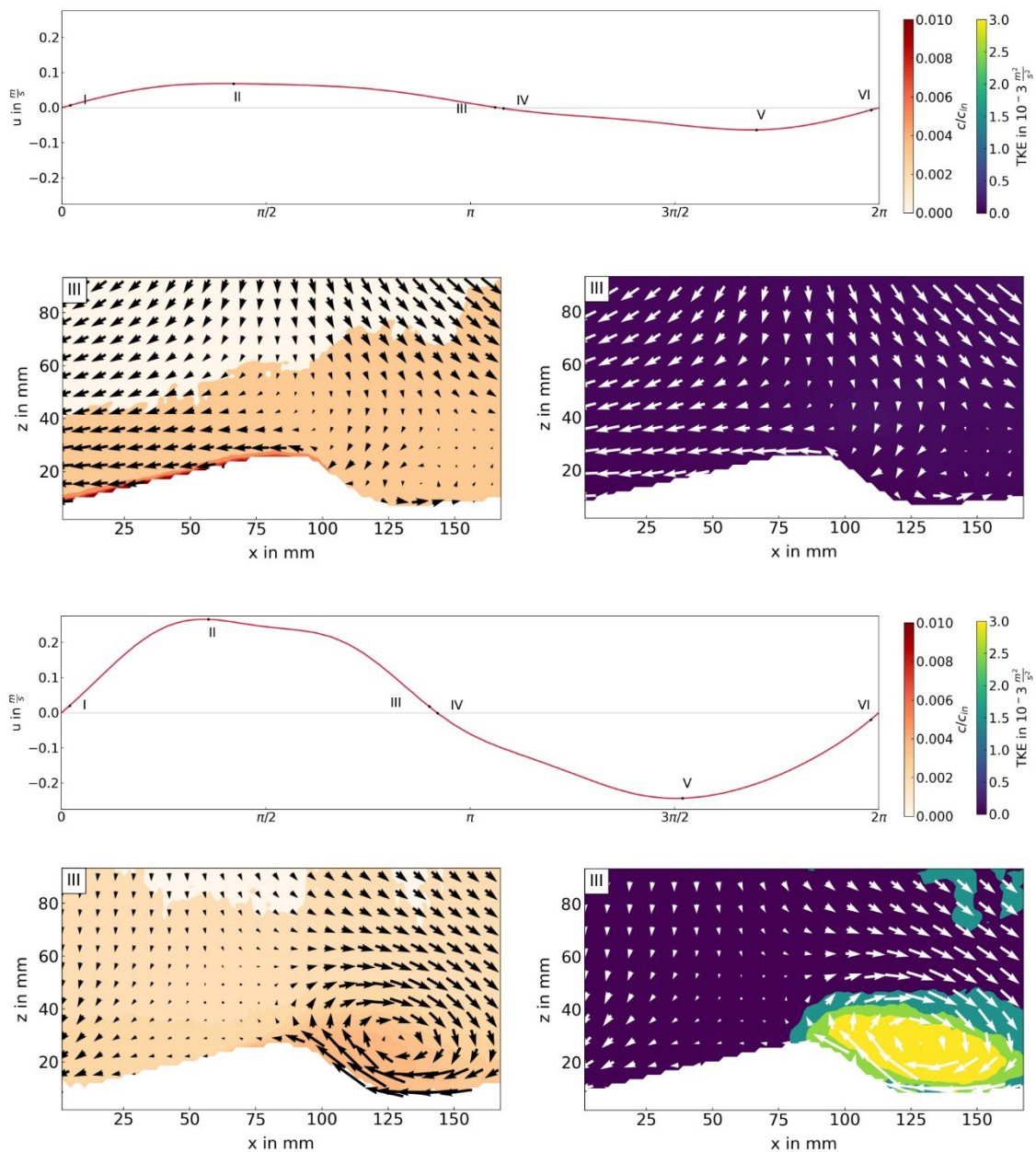


Abbildung 2: Einzelne Phase (III) des Konzentrationsfeldes mit Geschwindigkeitsvektoren (links) und des Feldes der turbulenten kinetischen Energie mit Geschwindigkeitsvektoren (rechts) jeweils für ruhige (oben) und stürmische (unten) Bedingungen.

Im Feld der Turbulenten Kinetischen Energie TKE fallen sofort die hohen Werte im Ablösebereich auf, während das TKE-Feld für das ruhige Szenario kaum Turbulenz anzeigt. Insgesamt reichen die Konzentrations- und Turbulenzmessungen alleine nicht zur Bestimmung des turbulenten Transports aus. Zur Bestimmung des Transports müssen vertikale Reynoldsflüsse $w'c'$ berechnet werden, die die Geschwindigkeits- und Konzentrationsfluktuation instantan verknüpfen.

Deshalb sind in Abbildungen 3a und 3b für ruhige und stürmische Wellenbedingungen sechs Phasenmittlungen (aus 100) des vertikalen Reynoldsflusses $\langle w'c' \rangle$ dargestellt. Die ausgewählten Phasen repräsentieren die Maxima der Wellenbewegung (II, V) und die Phasen vor und nach dem Richtungswechsel der Wellenbewegung (III, IV und VI, I). Für das Wellenszenario „ruhig“ in Abbildung 3a ist wieder festzustellen, dass für alle Phasen die Strömung der Rippelkontur folgt. Eine Strömungsablösung kann nicht festgestellt werden. Die Magnitude des

Reynoldsflusses insgesamt ist niedrig, die räumliche Verteilung weist fast ausschließlich positive Werte auf, die sich am Boden insbesondere auf der Rippelseite mit geringer Hangneigung konzentrieren. Darüber ist über die Wassersäule ein konstant positiver vertikaler Transport festzustellen.

Im Gegensatz dazu zeigt das Wellenszenario „stürmisch“ in Abbildung 3b deutlich andere Prozesse. Zum einen entsteht an der steilen Rippelflanke nach Strömungsablösung ein Rezirkulationsbereich, in dem zuvor hohe Turbulenzwerte beobachtet wurden. Die Bestimmung des vertikalen Reynoldsflusses weist gerade für diesen Bereich auch einen verstärkten vertikalen turbulenzbedingten Transport auf, der den Transport über einer ungestörten Bodengrenzschicht in Ausdehnung und Magnitude deutlich überschreitet. Die Werte für $\langle w'c' \rangle$ auf der steilen Seite des Rippels sind bis zu fünf Mal größer als bei Abwesenheit von Ablösung im Fall des Szenarios „ruhig“. Das Maximum von $\langle w'c' \rangle$ wird dort erreicht, wo die Überströmung der Rippelspitze auf die aufsteigende Rezirkulation des Ablösegebiets trifft. In Phase V ist zu erkennen, dass sich über der Rippelspitze eine Zone mit deutlich positivem Reynoldsfluss bildet, bis zum oberen Rand des Beobachtungsgebiets. Dies sind noch anhaltende turbulente Transportvorgänge aus vorherigen Wirbelperioden.

Relevant für die Modellierung des bodennahen turbulenten Transports ist die Prandtl'sche Mischungsweglänge, die die Proportionalität von Reynoldsfluss und dem Produkt der Gradienten von mittlerer Geschwindigkeit und Konzentration angibt. Die Mischungsweglänge wird vorwiegend in der Modellbildung und Simulation turbulenter Strömungen verwendet, um eine Abschätzung der Reynoldsspannungs- und -turbulenzgrößen aus den mittleren Geschwindigkeits- und Konzentrationsfeldern zu gewinnen.

In Abbildung 4 sind die Profile der Mischungsweglänge über dem Boden aufgetragen. Rechts sind die Profile für die beiden Wellenszenarien für den asymmetrischen Rippelboden zu sehen. Der Einfluss der Rippelform ist sehr deutlich. Die Mischungsweglänge ist im Fall des ruhigen Szenarios kleiner, als bei stürmischem Szenario. Die Rippelstruktur wirkt bei stürmischem Wellen deutlich weiter in die Bodengrenzschicht. Bei symmetrischen Rippel dagegen treten kaum Unterschiede in der Mischungsweglänge zwischen ruhig und stürmisch auf.

Diskussion

Für den asymmetrischen Rippelboden kann für das ruhige Wellenszenario festgestellt werden, dass auf der Rippelseite mit geringerer Hangneigung eine bodennahe Schicht erhöhter Tracerkonzentration entsteht. Bei geringer Turbulenz entsteht aber kaum vertikaler turbulenter Transport. Ohne Ablösung ist der turbulente Transport auf der Seite mit hoher Hangneigung gering.

Im stürmischen Wellenszenario erhöht sich im Fall des asymmetrischen Rippelbodens der Vertikaltransport erheblich durch das Auftreten von Scherströmung, Ablösung und Rezirkulation, auch gegenüber den Werten für symmetrische Rippel (Kandler 2021). Im Bereich der Rezirkulation treten die höchsten Reynoldsflüsse auf, wenn freigesetzter Tracer aus der Rippelspitze auf die aufwärts strömende Rezirkulation des Ablösegebiets trifft. Über der Rippelspitze entsteht so über mehrere Perioden hinweg eine Zone mit aufwärts gerichtetem Transport des Tracerstoffes, der das ausgetretene Bodengrundwasser darstellt.

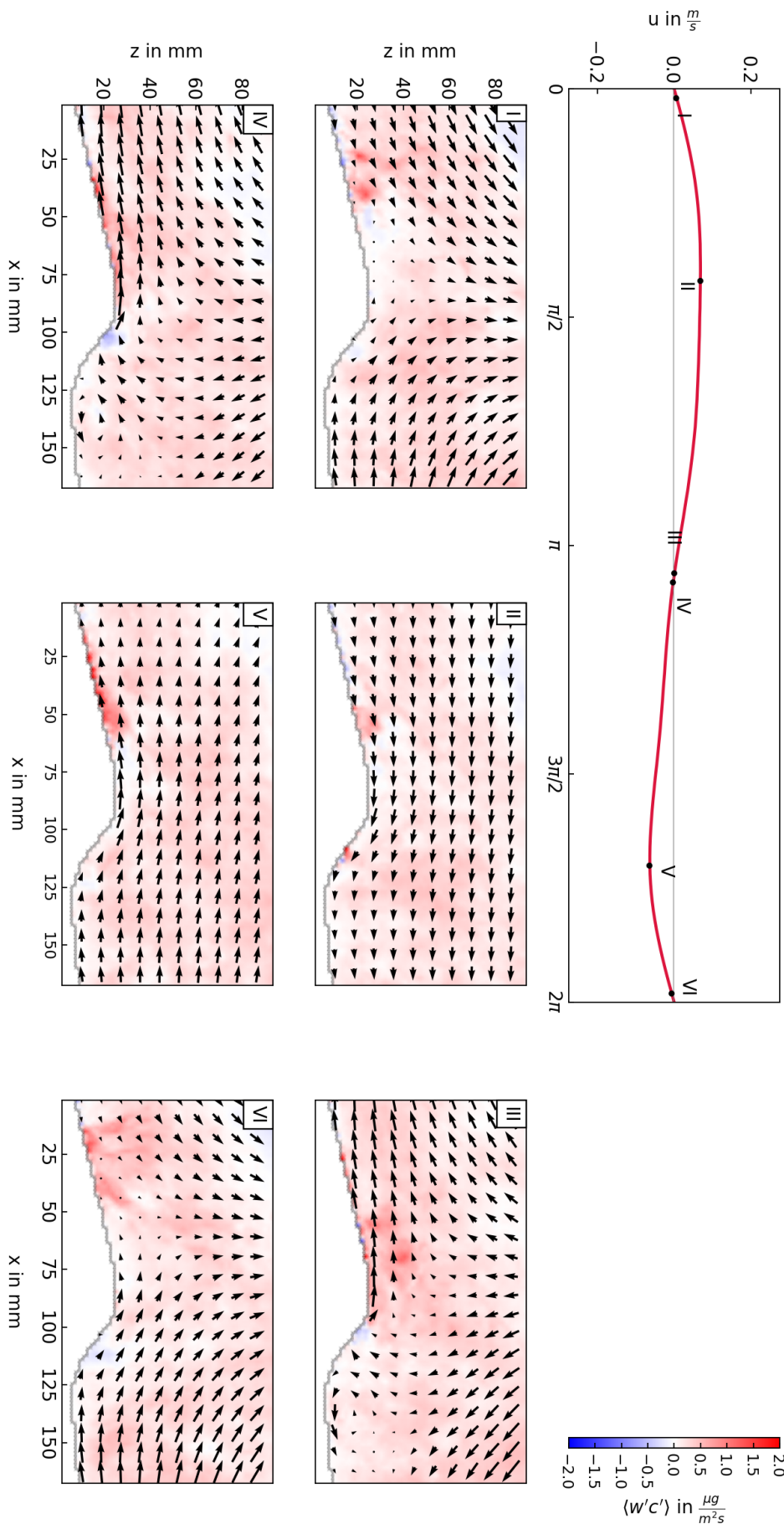


Abbildung 3a: Reynoldsfluss $\langle w'c' \rangle$ über asymmetrischen Rippelstrukturen für sechs Phasen der Wellenperiode, für das Wellenszenario ruhig (fünffach vergrößerte Skala gegenüber 3b)

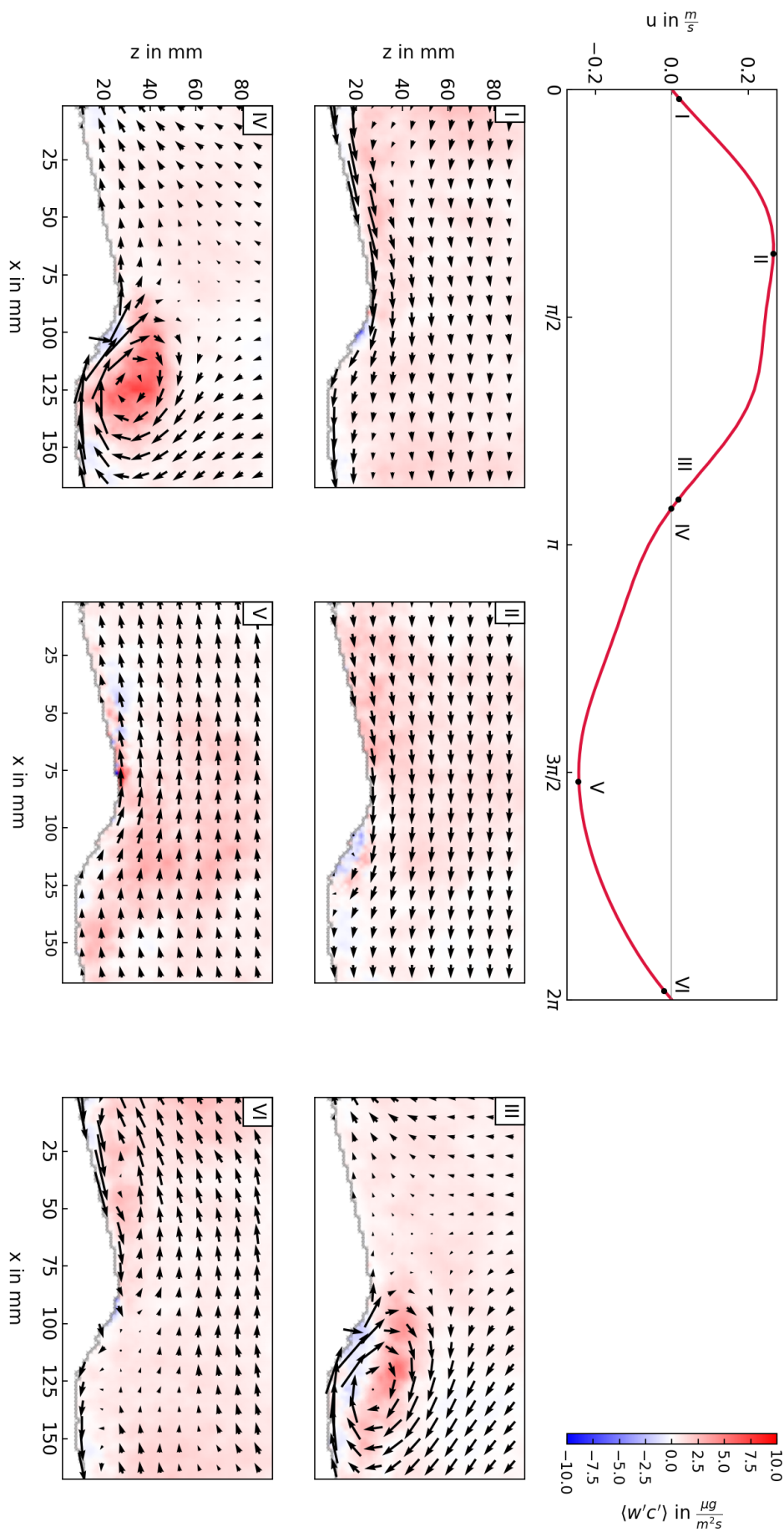


Abbildung 3b: Reynoldsfluss $\langle w'c' \rangle$ über einem Boden mit asymmetrischen Rippelstrukturen für sechs Phasen der Wellenperiode, für das Wellenszenario stürmisch

Bei der Verwendung der Mischungsweglänge in der Simulation für die Modellierung turbulenter Reynoldsspannungen und -flüsse aus den zeitgemittelten Ergebnisgrößen ist zukünftig nicht nur das Wellenszenario, sondern auch die Asymmetrie der Rippelform und die Steigung der Flanken zu berücksichtigen, welche sich aus den örtlichen Strömungsbedingungen ableiten lassen.

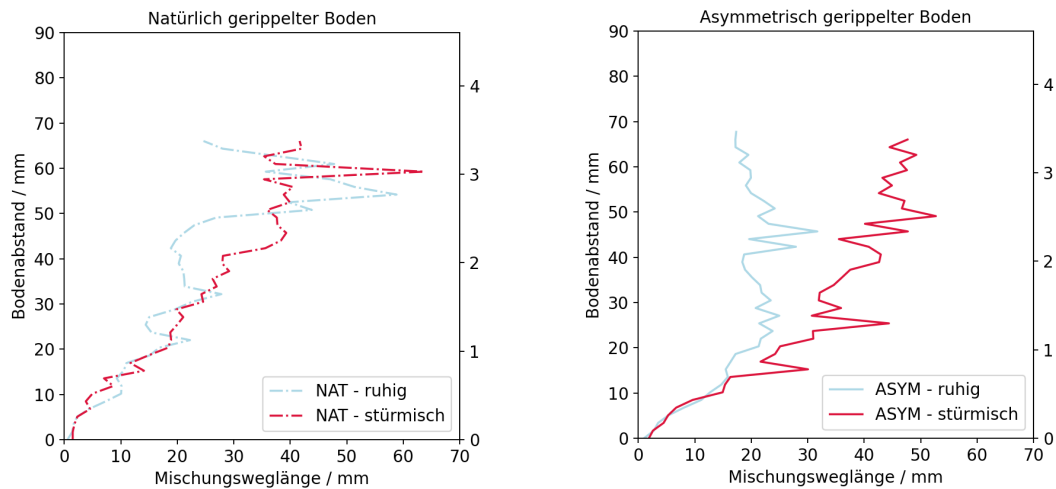


Abbildung 4: Prandtl'sche Mischungsweglänge über natürlichen symmetrischen (links) und asymmetrischen Rippelböden (rechts) für die Wellenszenarien „ruhig“ und „stürmisch“

Literatur

- Crimaldi, J.P., 2008:** "Planar laser induced fluorescence in aqueous flows", *Exp. Fluids* 44, 6, 851–863.
- Hall, S.J., 2002:** "The Continental shelf benthic ecosystem: current status, agents for change and future prospects", *Environmental Conservation* 29 (3):350-374
- Hare, J. et al., 2014:** "Observations of the space-time structure of flow, turbulence, and stress over orbital-scale ripples", *Geophys. Res. Oceans*, 119, 1876–1898
- Huettel, M. et al., 1996:** "Flow-induced uptake of particulate matter in permeable sediments", *Limnol. Oceanogr.*, 41(2), 309-322
- Huettel, M. et al., 2014:** "Benthic Exchange and Biogeochemical Cycling in Permeable Sediments", *Annu. Rev. Mar. Sci.* 2014. 6:23–51
- Jurasinski, G.; Janssen, M.; Voss, M.; Böttcher, M. E.; Brede, M.; Burchard, H. et al., 2018:** Understanding the Coastal Ecocline: Assessing Sea-Land-Interactions at Non-tidal, Low-lying Coasts Through Interdisciplinary Research, *Front. Mar. Sci.*, doi: 10.3389/fmars.2018.00342
- Kandler, L.; Grundmann, S.; Brede, M., 2021:** PIV-LIF Untersuchungen von passivem Skalartransport über Bodenrippeln. Experimentelle Strömungsmechanik - 28. Fachtagung, 7.-9. September 2021, Bremen. Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA e.V., Karlsruhe, 32.1-32.7
- Karow, N., Bestier, T., Grundmann, S., Brede, M., 2017:** „Grundwassereintrags in marinen Bodengrenzschichten“, Experimentelle Strömungsmechanik, 25. Fachtagung, 5.-7. September 2017, Karlsruhe, Karlsruhe, Deutsche Gesellschaft für Laser-Anemometrie GALA e.V. pp. 551–558
- Karow, N., 2019:** "Waves and turbulence on wavy coastal seabeds inducing vertical scalar transport", Dissertation, University of Rostock
- Malarkey, J. et al., 2015:** "Mixing efficiency of sediment and momentum above rippled beds under oscillatory flows", *Continental Shelf Research* 108, 76–88
- Precht et al. 2004:** "Oxygen dynamics in permeable sediments with wave-driven pore water exchange", *Limnol. Oceanogr.*, 49(3), 693-705
- Santos, I.R. et al., 2011:** "The driving forces of porewater and groundwater flow in permeable coastal sediments: A review" *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 49:351–368
- Taniguchi, M. et al., 2019:** "Submarine Groundwater Discharge: Updates on Its Measurement Techniques, Geophysical Drivers, Magnitudes, and Effects", *Front. Environ. Sci.* 7:141
- Yarborough, J.M., 1974:** "cw dye laser emission spanning the visible spectrum", *Appl. Phys. Lett.* 24, 12, 629–630.
- Yuan, J. and Wang, D., 2019:** "An Experimental Investigation of Acceleration-Skewed Oscillatory Flow over Vortex Ripples", *Geophys. Res. Oceans*, 124, 9620–9643