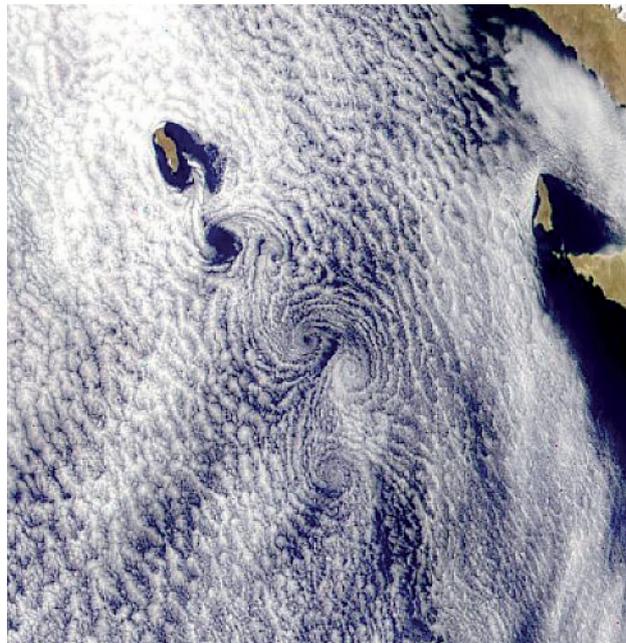


Algenblüte in ozeanischen Wirbeln

Von Ulrike Feudel und Mathias Sandulescu

Wechselnde physikalische Umweltbedingungen spielen für die zeitliche Entwicklung von Ökosystemen eine herausragende Rolle. Unser Beitrag zeigt, wie in Strömungswirbeln lokalisierte Algenblüten durch das perfekte Zusammenspiel von Strömung und biologischen Wachstumsprozessen entstehen können.



NASA-Satellitenaufnahme einer Wirbelstraße in der Atmosphäre, die durch die Wolkenbildung sichtbar wird. Das Hindernis, hinter dem die Wirbelstraße auftritt, ist die Insel Guadalupe.

Changing physical conditions in the environment play an important role for the temporal evolution of ecosystems. Our contribution explains how algae blooms localized in vortices of ocean currents can arise due to the perfect interplay between the current and biological growth processes.

Natürliche Ökosysteme im Meer und an Land entwickeln sich auf der Basis zweier Grundprinzipien: Zum einen wird das Wachstum verschiedener Arten von Pflanzen und Tieren durch das Prinzip des Fressens und Gefressenwerdens bestimmt. Es bilden sich Nahrungsketten und -netze heraus, an deren Ende oft der Mensch steht. Zum anderen beeinflussen Umweltbedingungen die Entwicklungsmöglichkeiten der einzelnen Arten: Temperatur, Licht und Nahrungsangebot sind wichtige Einflussfaktoren für das Wachstum von Pflanzen und Tieren. Für Ökosysteme in Seen, Flüssen und Ozeanen spielen auch die Strömungsverhältnisse eine entscheidende Rolle.

Algenwachstum im Ozean

Algen, die pflanzlichen Organismen des Meeres, stehen am Anfang der Nahrungsketten im Ozean. Sie wandeln mit Hilfe von Licht Kohlendioxid (CO_2) und andere im Wasser gelöste anorganische Substanzen in

Biomasse um (Photosynthese). Algen sind die Nahrungsgrundlage von kleinen Meerestieren wie Muscheln und Zooplankton, wozu z.B. Ruderfußkrebse - vergleichbar mit Wasserflöhen im Süßwasser - gehören. Das Zooplankton wiederum wird von kleinen Fischen und Fischlarven gefressen. Diese Nahrungskette Nährstoffe-Algen-Zooplankton ist eine der wichtigsten im Ozean. Weil die Algen photosynthetisch gelöstes CO_2 binden, sind sie für den CO_2 -Haushalt der Erde und damit für die Klimaentwicklung außerordentlich wichtig.

Unter besonderen Bedingungen kann sich das Algenwachstum stark erhöhen: Die Algen erreichen dann hohe Konzentrationen, die auch als Algenblüten bezeichnet werden. Obwohl die Organismen sehr klein sind (ca. 0,02 bis 0,5 mm), sind extreme Algenblüten auch mit bloßem Auge als starke Trübung des Wassers oder gar als grüner Teppich sichtbar.

Meeresströmungen sorgen dafür, dass sich die Umweltbedingungen für die Organismen

ständig ändern. Dies ist insbesondere in den durch Gezeiten beeinflussten Küstengewässern und in der Umgebung von Inseln der Fall. Algen wachsen in diesen Gebieten besonders gut, da dort sowohl Nährstoffe als auch Licht in großem Maße vorhanden sind. Die Nährstoffe gelangen über die Flüsse ins Meer und stammen z.B. aus natürlichen Quellen, aber auch aus Abwässern und landwirtschaftlicher Düngung. Außerdem finden sich in Küstennähe so genannte Auftriebsgebiete, in denen durch bestimmte Wind- und Strömungsverhältnisse nährstoffreiches Wasser an die Oberfläche „gesaugt“ wird. Die höhere Nährstoffkonzentration in den unteren Schichten des Meeres hat ihre Gründe: Da Algen Licht benötigen, können sie nur in der oberen Schicht des Ozeans leben und zehren dort die Nährstoffe auf. Zusätzlich sinkt abgestorbenes biologisches Material auf Grund der Gravitation in tiefere Wasserschichten ab.

Das Algenwachstum in der Nähe von Flussmündungen und Auftriebsgebieten hängt besonders stark von den Strömungsverhältnissen ab, da diese das Nährstoffangebot beeinflussen. Die höchsten Algenkonzentrationen sind - wie Satellitenfotos zeigen - an den Küsten zu finden. Auffällig ist dabei eine ausgeprägte räumliche Struktur der Algenverteilungen, die in etwa die Strömungsverhältnisse auf mittleren Skalen (ca. 10 bis 500 km) widerspiegelt. Besonders häufig bilden sich Wirbel und filamentartige Strukturen.

Typische Strömungsmuster

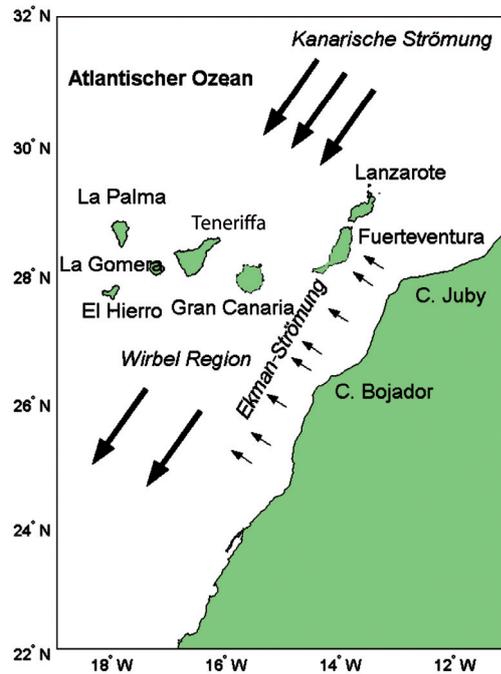
Ein wichtiger Antriebsmechanismus für Strömungen im Meer ist der Wind. Er bestimmt durch seine vorherrschende Richtung die großskaligen Hauptströmungen. Liegt in dieser Hauptstromrichtung eine Insel, dann muss das Wasser um diese herumströmen. Das kann zur Ausbildung einer Wirbelstraße führen: direkt hinter der Insel bildet sich ein Wirbel, der sich im Laufe der Zeit von der Insel ablöst, entlang der Hauptströmungsrichtung transportiert wird und später verschwindet. Sobald sich ein Wirbel abgelöst hat, entsteht ein neuer mit entgegengesetzter Drehrichtung. Die Herausbildung einer solchen Struktur beim Umströmen von Hindernissen ist ein allgemeines Phänomen, das sowohl im Ozean als auch in der Atmosphäre zu beobachten ist.

An Küsten kann ein weiteres Strömungsmuster entstehen: Hier kann die so genannte

Ekman-Strömung - eine von der Küste Richtung offenes Meer laufende Strömung - dafür sorgen, dass nährstoffreiches Wasser aus der Tiefe aufsteigt und an die Oberfläche transportiert wird. Ein solches Strömungsbild findet sich beispielsweise bei den Kanarischen Inseln, wo die Hauptströmungsrichtung von Nordost nach Südwest und damit in etwa parallel zur afrikanischen Küste verläuft. Vor der Küste gibt es jedoch ein Auftriebsgebiet, dessen Nährstoffe durch die Ekman-Strömung in Richtung der Kanarischen Inseln transportiert werden. Hinter den Inseln sind Wirbel von ungefähr 50 bis 100 km Durchmesser zu beobachten, die durch die Hauptströmung pro Tag etwa 5 bis 6 km weit transportiert werden.

Strömungsdynamik und biologische Prozesse

Inwieweit nun wirken Strömungen und Wachstumsprozesse von Algen zusammen, um die auf Satellitenbildern sichtbaren charakteristischen Strukturen hervorzubringen? Um diese Frage zu klären, wurde ein vereinfachtes Modell untersucht, das die biologischen Prozesse an die Strömungsdynamik koppelt. Die typischen Strömungsmuster erhält man aus einem empirischen, jedoch mathematisch vollständig analytischen Ansatz für eine horizontale Oberflächenströmung. Die Modellparameter, die die Eigenschaften der Strömung beschreiben, wurden dabei an die Situation der Kanarischen Inseln angepasst. Um die mathematische Formulierung möglichst einfach zu gestalten, wurde statt des gesamten Inselarchipels nur eine Insel betrachtet. Das Wechselspiel der Arten wird durch ein einfaches Nahrungskettenmodell beschrieben, das die drei Ökosystemkomponenten Nährstoffe, Algen und Zooplankton umfasst. Alle drei Komponenten werden durch das Strömungsfeld transportiert. Darüber hinaus wird das Auftriebsgebiet als kleines Rechteck an der Küste angenommen, in dem zusätzlich Nährstoffe durch vertikalen

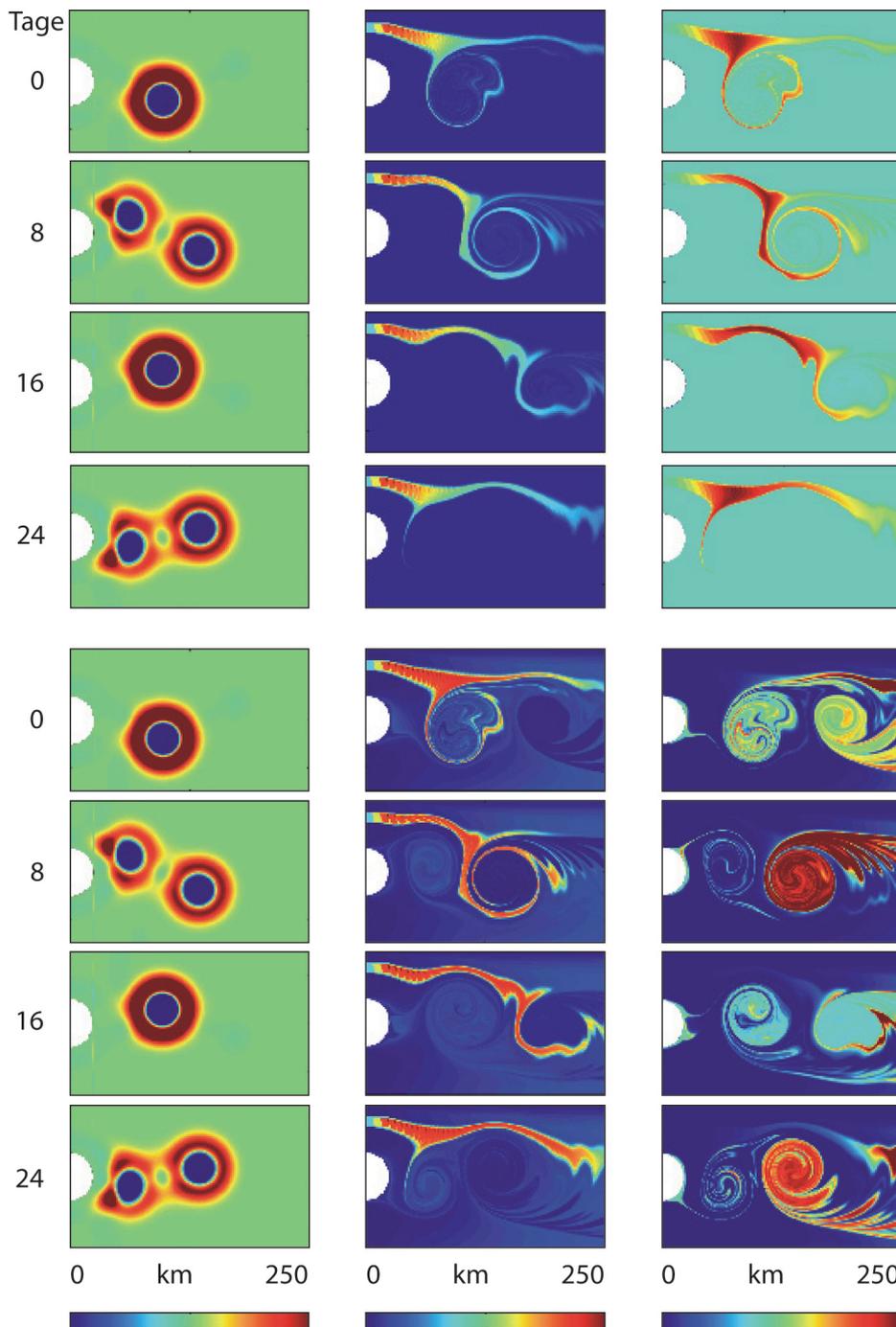


Schematisch dargestellte Strömung im Gebiet der Kanarischen Inseln.

Transport aus den unteren Meeresschichten an die Oberfläche gelangen.

Algenblüten bei verschiedenen Umweltbedingungen

Abhängig von der Verteilung der Ökosystemkomponenten sind zwei verschiedene Szenarien denkbar. Im ersten Szenario wird angenommen, dass das Wasser, das mit der Hauptströmung in das Beobachtungsgebiet mit der Insel fließt, alle Ökosystemkomponenten in hoher Konzentration enthält. Das Ökosystem befindet sich dann in einem Gleichgewichtszustand. In diesem Fall kann eine erhöhte Algenkonzentration in der „Nährstofffahne“ des Auftriebsgebiets beobachtet werden. Die zusätzlichen Nährstoffe, die durch vertikalen Transport zur Verfügung stehen, verstärken das Algenwachstum, so dass für einige Zeit hohe Konzentrationen auftreten. Die Konzentrationsverteilungen erinnern an filamentartige Strukturen, die auf Satellitenbildern zu sehen sind. Diese Filamente bilden sich außerhalb der Wirbel. Die sich hinter der Insel bildenden Wirbel sind jedoch dafür verantwortlich, dass Nährstoffe aus dem Auftriebsgebiet auch auf die der Auftriebszone abgewandte Seite der Wirbelstraße transportiert werden. So finden sich auch weitab der Küste, wo auf Grund des Nährstoffmangels ohne die Verwirbelung durch das Strömungsfeld kaum Algenwachstum



Algenblüte in der „Nährstofffahne“ eines Auftriebsgebiets: Zeitliche Entwicklung der Verteilung von Nährstoffen (mittlere Säule) und Algen (rechte Säule) über einen Zeitraum von 24 Tagen bei hohem Zufluss von Nährstoffen, Algen und Zooplankton mit der Hauptströmungsrichtung hinter einer Insel (weiß). Die linke Säule zeigt die Lage der Wirbel an, wobei das Innere der Wirbel blau dargestellt ist. Die Farbskala der Nährstoffe und Algen reicht von blau über grün nach rot mit wachsenden Konzentrationen.

Lokalisierte Algenblüte in Wirbeln: Zeitliche Entwicklung der Verteilung von Nährstoffen (mittlere Säule) und Algen (rechte Säule) über einen Zeitraum von 24 Tagen bei niedrigem Zufluss von Nährstoffen, Algen und Zooplankton mit der Hauptströmungsrichtung hinter einer Insel (weiß). Die linke Säule zeigt wiederum die Lage der Wirbel an. Die Farbskala der Nährstoffe und Algen reicht von blau über grün nach rot mit wachsenden Konzentrationen.

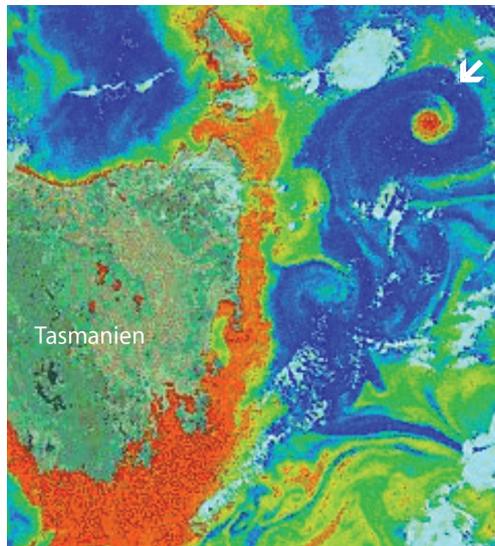
stattfinden würde, die Organismen in erhöhten Konzentrationen.

Das zweite Szenario geht davon aus, dass der Zustrom in das Beobachtungsgebiet sehr viel weniger Nährstoffe, Algen und Zooplankton enthält. In diesem Fall ergibt sich jedoch ein überraschendes Bild: Obwohl hier die gleiche Nährstoffzufuhr durch das Auftriebsgebiet erfolgt, scheint das auf die Algenkonzentra-

tion in der „Nährstofffahne“ kaum Einfluss zu haben. Die Algenkonzentrationen, die mit der Hauptströmung das Auftriebsgebiet erreichen, sind so klein, dass es zu keinem verstärkten Wachstum der Algen kommen kann. Ein Wachstum wäre nur dann zu beobachten, wenn die Algen genügend Zeit hätten, sich zu entwickeln. Der Transport außerhalb der Wirbelstraße durch die Hauptströmung

ist jedoch so schnell, dass die Algen das Beobachtungsgebiet schon fast verlassen haben, bevor es zu einer Algenblüte kommt. Statt einer Verstärkung des Algenwachstums durch die aufgetriebenen Nährstoffe ist überraschenderweise eine Algenblüte innerhalb der Wirbel zu beobachten. Diese Algenblüte bleibt sogar auch dann erhalten, wenn die Modellrechnung verändert und das Auftriebs-

gebiet eliminiert wird. Die Ergebnisse zeigen, dass diese stark lokalisierte Algenblüte unabhängig vom Auftrieb von Nährstoffen auftreten kann, so lange überhaupt Nährstoffe vorhanden sind. Tatsächlich sind solche lokalisierten Algenblüten auch auf verschiedenen Satellitenbildern sichtbar, z. B. in der Umgebung von Tasmanien. Hier lässt sich ein Wirbel erkennen, der eine extrem hohe Algenkonzentration besitzt. In dieser Region gibt es kein ausgeprägtes Auftriebsgebiet - was umso deutlicher macht, dass die Herausbildung von lokalisierten Algenblüten nicht zwangsläufig an den vertikalen Transport von Nährstoffen gebunden sein muss.



NASA-Satellitenaufnahme einer lokalisierten Algenblüte in einem Wirbel (Pfeil) bei Tasmanien.

Mechanismus der lokalisierten Algenblüte

Unsere Modellrechnungen zeigen einen möglichen Mechanismus, wie eine lokalisierte Algenblüte entstehen kann. Als wichtigste Voraussetzung muss folgendes erfüllt werden: Die Aufenthaltszeit der Algen im Beobachtungsgebiet muss lang genug sein, um ein Algenwachstum zu ermöglichen, da der Transport durch Strömung im Allgemeinen viel rascher abläuft als das Wachstum. In unserem Modell beläuft sich die biologische Zeitskala auf ca. 15 bis 25 Tage, die die Algen brauchen, um bei sehr niedrigen Anfangskonzentrationen eine Blüte zu entwickeln. Zooplankton braucht bis zu seiner maximalen Konzentration ca. 30 bis 40 Tage. Nährstoffe und Algen, die mit der Hauptströmung außerhalb der Wirbel transportiert werden, benötigen ca. 16 Tage, um das Beobachtungsgebiet zu verlassen. Somit kann es nur am Ende dieses Gebiets in der „Nährstofffahne“ zu hohen Algenkonzentrationen kommen. Die einzige Möglichkeit eine längere Aufenthaltszeit zu erreichen, besteht darin, dass die Nährstoffe und Algen mit den Wirbeln transportiert werden. Die Wirbel bewegen sich langsamer, rotieren dabei und vermischen sich nur sehr langsam mit dem sie umgebenden Wasser. Werden Nährstoffe und Algen von einem Wirbel erfasst, dann sind sie durch den geringen Austausch mit der

Umgebung praktisch für lange Zeit in diesen Wirbeln „gefangen“. Die Wirbel in unserem Modell brauchen etwa 50 Tage, bevor sie das Beobachtungsgebiet verlassen. Den Algen steht damit genügend Zeit zur Verfügung, um eine Blüte zu entwickeln. Diese bricht später allerdings durch den zunehmenden Fraß des ebenfalls wachsenden Zooplanktons sowie auf Grund des bald auftretenden Nährstoffmangels wieder zusammen.

Wie können nun Nährstoffe und Algen in die Wirbel gelangen und damit von einer längeren Aufenthaltszeit profitieren? Verantwortlich dafür sind spezielle dynamische Strukturen, die das Strömungsfeld hinter Hindernissen charakterisieren. In der Nähe der Insel ist die Strömungsgeschwindigkeit sehr gering, Nährstoffe und Algen sind daher immer vorhanden. Direkt hinter der Insel bilden sich Filamente aus, also charakteristische Strömungsmuster, die immer in Wirbelstraßen auftreten. Sie transportieren Nährstoffe und Algen direkt in die Wirbel. Diese kleinen Filamente, die in den Konzentrationsverteilungen von Nährstoffen und Algen gut zu sehen sind, bilden eine „Brücke“ zwischen der Insel und den sich ablösenden Wirbeln. Für die Strömung selbst spielen die Filamente kaum eine Rolle, für den Transport von Nährstoffen und Algen sind sie aber essenziell. Dass diese Brückenbildung einen wichtigen Transportmechanismus beinhalten könnte, ist bisher kaum beachtet worden, da diese Muster nur sehr schwer in Computermodellen zu berechnen sind. Im Zusammenspiel zwischen biologischen Prozessen und Strömung kommt den „Brücken“ eine große Bedeutung zu: ohne sie könnte der Mechanismus der lokalisierten Algenblüten, wie er hier geschildert wurde, nicht funk-

nieren. Eine lokalisierte Algenblüte ist damit das Resultat eines perfekten Zusammenspiels von Strömung und Wachstum. Die Wirbel als prominente Strömungsmuster fungieren als „Inkubatoren“ für ein verstärktes Algenwachstum.

Die Wechselwirkung von Strömung und biologischem Wachstum ist nicht nur der bestimmende Mechanismus für die Ausbildung von ausgeprägten Mustern in der Algenkonzentration in den Ozeanen, sondern kann ebenfalls Klimaphänomene wie El Niño beeinflussen. Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sich bestimmte Strömungsverhältnisse positiv auf die Koexistenz von Arten und damit auf die Biodiversität in den Ozeanen auswirken.

Die Autoren



Prof. Dr. Ulrike Feudel leitet die Arbeitsgruppe für Theoretische Physik/Komplexe Systeme am Institut für Chemie und Biologie des Meeres (ICBM). Sie studierte Physik an der Humboldt-Universität und promovierte dort

1986 mit einer Arbeit über Strukturbildungsprozesse. Danach profilierte sie sich auf dem Gebiet der nichtlinearen dynamischen Systeme an der Universität Potsdam. Dort erfolgte 1996 auch ihre Habilitation. Als Heisenberg-Stipendiatin der DFG arbeitete sie 1995 und 1998 zweimal für längere Zeit in den USA an der University of Maryland, College Park. Im Jahr 2000 erhielt sie einen Ruf an die Universität Oldenburg. Im Mittelpunkt ihrer Arbeit steht die Entwicklung von Methoden zur Untersuchung nichtlinearer dynamischer Systeme und ihrer Anwendung auf Umweltmodelle. Die Vielfalt der bearbeiteten Probleme reicht von der Analyse allgemeiner Populationsmodelle für Nahrungsketten und -netze über Strukturbildung im Wattsediment bis zur Wechselwirkung biologischer Systeme mit turbulenter Strömung.



Mathias Sandulescu hat Physik an der Universität Oldenburg und Bergen (Norwegen) studiert. 2001 hat er das Diplom mit einer experimentellen Arbeit auf dem Gebiet der Hydrodynamik abgeschlossen und ist seit

2002 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am ICBM. Zurzeit erforscht er im Rahmen der Promotion die Dynamik von Nahrungsketten in offenen Meereströmungen.