



er auf Sylt Urlaub macht, schätzt vor allem die kilometerlangen Strände der Insel. Urlaubler liegen dort in der Sonne oder lassen sich während langer Spaziergänge den Wind um die Ohren pfeifen; Kinder sammeln Muscheln und anderes Strandgut oder bauen Sandburgen. Bei Niedrigwasser beobachten große wie kleine Hobbyforscher das Treiben von Wattwürmern, Krebsen und vielem mehr.

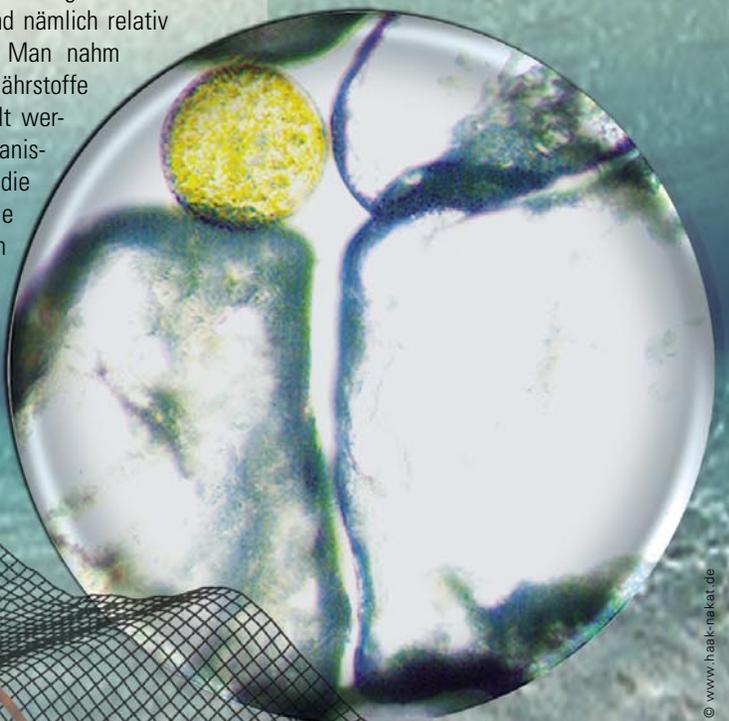
das er aus dem Labor mit gebracht hat. Er muss das Glas nur noch kurz schütteln – und die Lösung färbt sich grasgrün. „Das ist Chlorophyll, das auch das Gras oder die Blätter von Bäumen grün färbt,“ erklärt Cook. „Hier stammt es aus winzigen Algen, die es wie alle Pflanzen für die Fotosynthese benötigen.“ Erst wenn man das Chlorophyll mit Azeton extrahiert, wird es sichtbar.

Raffinierte Sandkastenspiele – was Forscher an die Küsten zieht

In regelmäßigen Abständen kommen auch Wissenschaftler aus Bremen nach Sylt. Denn für die Mitarbeiter des Max-Planck-Instituts für marine Mikrobiologie sind die Strände der Insel ein riesiges Freilandlabor. Die Forscher interessieren sich in erster Linie allerdings nicht für Organismen, die man mit dem bloßen Auge sehen kann, sondern für solche, die zum größten Teil unsichtbar im Sand leben, der um Sylt herum teilweise periodisch mit Wasser überspült wird und dann wieder trocken fällt.

Sand besteht aus Siliziumdioxid. Chemisch betrachtet gibt es in der Natur wohl kaum ein langweiligeres, reaktionsträgeres Material. Dass im Sylter Sand trotzdem Leben steckt, kann Perran Cook, wissenschaftlicher Mitarbeiter am Bremer Max-Planck-Institut, mit einfachen Mitteln demonstrieren: Er nimmt eine Hand voll Sand und gibt diesen in ein Schraubdeckelglas. Dann schüttet er etwas Azeton dazu, ein farbloses Lösungsmittel, →

Experten schätzen, dass mehrere Hunderttausend unterschiedliche Mikroorganismen, vor allem verschiedene Algen- und Bakterienarten, zwischen den Sandkörnern leben (Abb. A). „Davon wurden bisher weniger als ein Prozent identifiziert“, sagt Antje Boetius, Leiterin der Forschungsgruppe „Mikrobielle Habitate“ am Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie. Das liegt wohl auch daran, dass Wissenschaftler bis vor wenigen Jahren nicht besonders viel Leben zwischen den Sandkörnern vermuteten. Im Vergleich zu schlammigem Untergrund strömt das Wasser durch Sand nämlich relativ schnell hindurch. Man nahm deshalb an, dass Nährstoffe schnell weggespült werden und Mikroorganismen demzufolge die Lebensgrundlage fehlt. Außerdem ist sandiger Meeresboden schwer zu untersuchen; es gab →

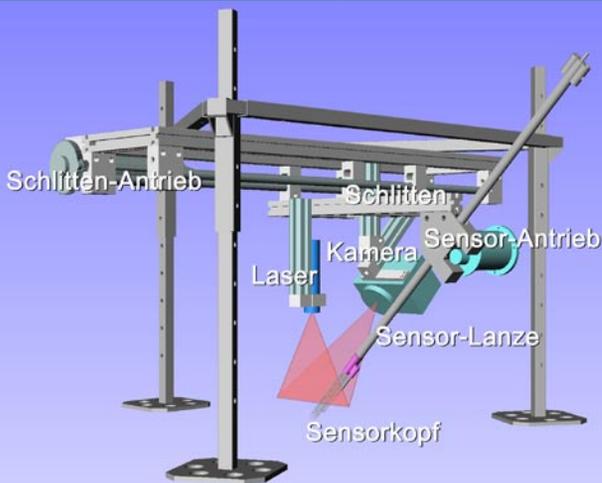


A

► **Zahlreiche Mikroorganismen, wie diese kleine Kieselalge, haften an der Oberfläche der Sandkörner. Vorne: 3D-Rekonstruktion einer Sandoberfläche mit Rippeln, die mithilfe von Lance-A-Lot vermessen wurde**

B

◀ **Lance-A-Lot** misst Erhebungen und Vertiefungen am Meeresboden mithilfe eines Laserstrahls, der an verschiedenen Positionen auf das Sediment gerichtet wird. Der reflektierte Strahl wird von einer Digitalkamera erfasst und aus diesen Daten die Bodenstruktur errechnet (s. Abb. A). Zur Ermittlung der Porenwassergeschwindigkeit wird der Sensorkopf in das Sediment gesteckt. Laser, Kamera und Sensoren werden mit einem Schlitten horizontal über das Sediment bewegt.



© MPI für marine Mikrobiologie

dem er nun – u. a. vor der Insel Sylt – die **Porenwasser-Advektion** untersucht, also den Austausch zwischen dem Wasser über dem Meeresboden und dem zwischen den Sandkörnern (dem Porenraum).

Die Geschwindigkeit dieses Austausches hängt maßgeblich von der Bodenstruktur (Topografie) ab. Janßens Apparat mit dem Namen „Lance-A-Lot“ kann deshalb zweierlei (**Abb. B**): Er liefert dreidimensionale Abbildungen der Bodenstruktur und misst, wie schnell sich das Wasser durch den Sand bewegt. Dabei nutzen die Forscher ein bewährtes Prinzip: Das Gerät spritzt einen Farbstoff unter die Sandoberfläche und ermittelt über optische Sensoren die Zeit, die der Wasserstrom zwischen den Sandkörnern benötigt, um den Farbstoff von der Injektionsstelle bis zur Sensorspitze zu transportieren. Aus dem Abstand zwischen Injektionsstelle und Sensor sowie der Laufzeit können die Wissenschaftler dann die Geschwindigkeit errechnen, mit der das Wasser durch den Sand strömt – und können diese nun mit der Topografie der Messstelle in Beziehung setzen.

Tatsächlich ist der Meeresboden nie ganz eben und das Wasser darüber steht nie still. „Und wo wir Sande finden, ist die Strömung

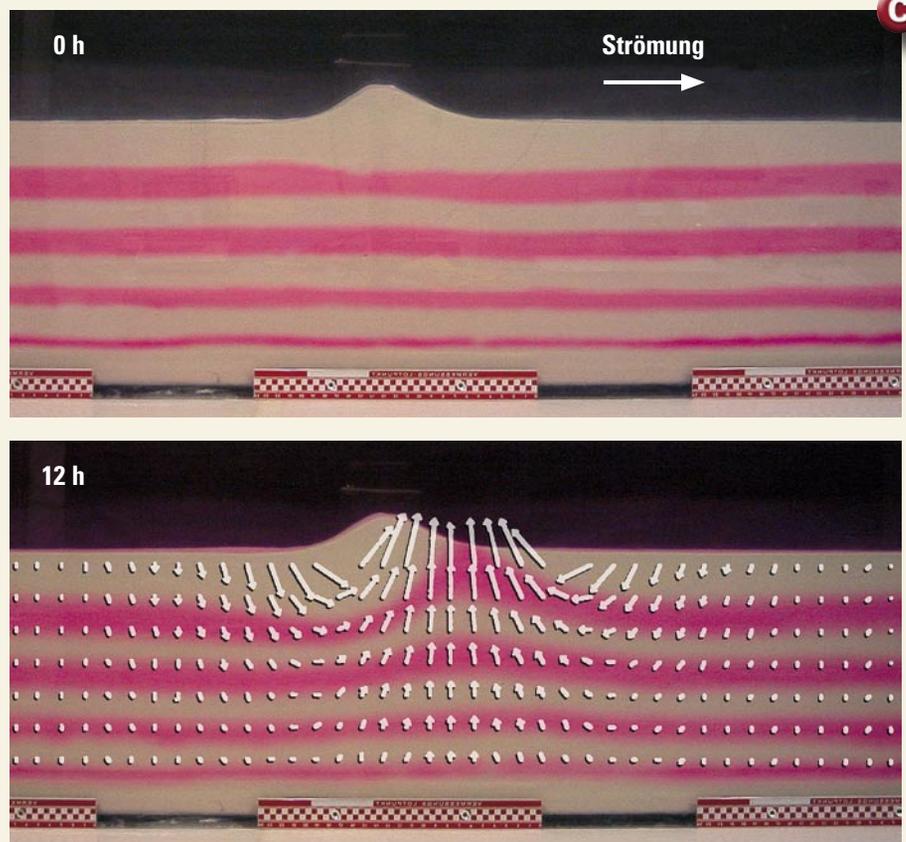
→ lange Zeit einfach keine geeigneten experimentellen Methoden. Inzwischen wissen die Forscher, dass Sande, die an den Küsten der Kontinente periodisch oder ständig mit Meerwasser bedeckt sind, wie gigantische **Filtersysteme** arbeiten. Denn über die Flüsse gelangen riesige Mengen organisches Material und anorganische Nährstoffe wie Nitrat und Phosphat ins Meer. Die im Sand lebenden Mikroorganismen nutzen diese Substanzen zum Wachstum und gewinnen daraus Energie. Dabei sorgen sie dafür, dass organisches Material abgebaut wird. Die Küstenregionen sind deshalb ein riesiges, sich selbst reinigendes Ökosystem.

NEUE AKTEURE IM KLIMAGESCHEHEN

Am Ende vieler Stoffwechselketten steht Kohlendioxid (CO_2). Umgekehrt wird das im Wasser gelöste CO_2 – z.B. von den Algen im Sand – auch wieder in organisches Material wie Kohlenhydrate oder Proteine verwandelt. Deshalb interessieren sich auch die Klimaforscher für die Küstenzonen der Kontinente. Kohlendioxid ist als so genanntes **Treibhausgas** mitverantwortlich für die in jüngster Vergangenheit beobachtete Klimaerwärmung. „Eines unserer wichtigsten Forschungsziele ist es deshalb, die Produktion und den Verbrauch von CO_2 in den Sanden quantitativ zu untersuchen,“ erklärt Antje Boetius. Davon erhoffen sich die Bremer Forscher Aussagen über die Bedeutung der **Küstensande** für das Klima.

▶ Das Porenwasser einzelner Sandlagen wurde gefärbt. Sobald Wasser über die Unebenheit des Bodens strömt, entsteht an der Sandoberfläche ein Druckgradient. Dieser pumpt Wasser durch den Sand. Die Pfeile im Bild unten zeigen das Strömungsmuster der Porenwasser-Advektion.

Die Aktivität der Mikroorganismen in den Sanden und damit auch die Geschwindigkeit, mit der diese Kohlendioxid fixieren (d.h. für den Zellaufbau nutzen) oder freisetzen, hängt sehr stark davon ab, wie schnell die im Wasser gelösten Nährstoffe zu den Mikroorganismen gelangen. Obwohl diese Transportprozesse extrem wichtig sind, wurden sie bisher kaum untersucht. Der Grund: Auch hier fehlten geeignete Messmethoden. Der Max-Planck-Forscher Felix Janßen musste deshalb erst einmal ein neues Gerät entwickeln, mit

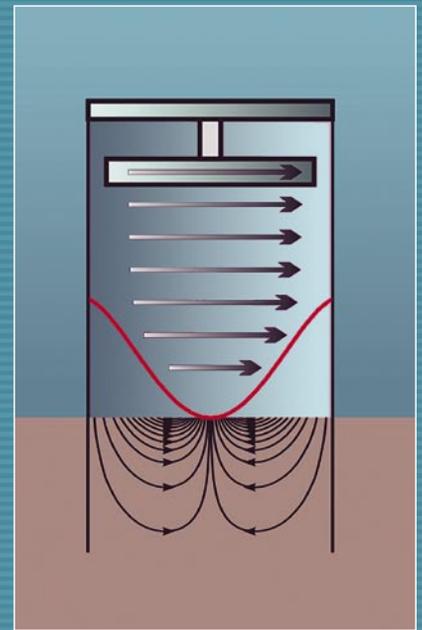
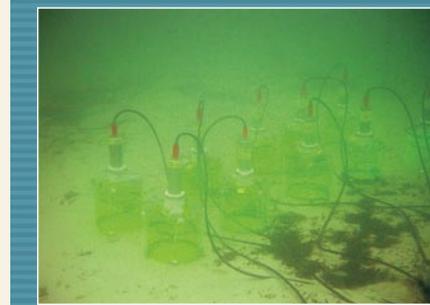
**C**

© MPI für marine Mikrobiologie

sowieso relativ hoch," gibt Felix Janßen zu bedenken. Das hält die Sande durchlässig. Wäre die Strömung schwächer, könnten sich auch kleinere Schwebeteilchen absetzen und der Meeresboden würde zunehmend aus feinkörnigem Schlack bestehen. Generell gilt: Je kleiner die Teilchen, desto kleiner sind auch die Räume dazwischen und desto länger braucht das Wasser, um hindurch zu strömen. Wasser fließt durch Sand also langsamer als durch Kies. Schlack ist im Vergleich dazu praktisch undurchdringlich; hier findet die Versorgung von Organismen mit Nährstoffen nur auf dem Wege der molekularen Diffusion statt.

Auf Sandböden sorgen die Meeresströmung und grabende Organismen wie Würmer oder Krebse dafür, dass ständig Erhebungen – z.B. kleine Hügel oder langgestreckte Rippelkämme – entstehen und wieder zerstört werden. Die Wasserströmung bewirkt, dass an den höchsten Erhebungen ein geringerer Wasserdruck herrscht als an deren Flanken. „Es handelt sich dabei um winzige Druckunterschiede, meist weniger als ein Millimeter Wassersäule," erklärt Janßen. „Aber genau diese Druckunterschiede sorgen dafür, dass Wasser durch den Sandboden gepumpt wird.“ Bereits in den frühen 1990er-Jahren untersuchte Markus Hüttel mit einer Gruppe von Kollegen am Max-Planck-Institut für marine Mikrobiologie dieses Phänomen in Strömungskanälen (**Abb. C**). Erste Experimente mit Lance-A-Lot in Nord- und Ostseesanden haben nun gezeigt, dass das Wasser auch unter natürlichen Bedingungen erstaunlich effektiv durch die Sande gepumpt wird und Geschwindigkeiten von mehreren Zentimetern bis Dezimetern pro Tag erreicht werden. „Wir berechnen jetzt per Computer die Zusammenhänge zwischen der Topografie des Meeresbodens und den Strömungsgeschwindigkeiten im Sand," so Felix Janßen. Ziel der Forscher sind Computermodelle, mit denen sich die realen Bedingungen zunächst rekonstruieren lassen, und mit denen sie später Vorhersagen treffen können über den für die Mikroorganismen am Meeresboden so wichtigen Nährstofffluss in Abhängigkeit von den Bodenverhältnissen.

Wie diese Strömungsgeschwindigkeiten das Leben im Sand beeinflussen, untersucht Per-ran Cook im Rahmen des EU-Projekts COSA (*Coastal Sands as Biocatalytical Filters*), das er gemeinsam mit Markus Hüttel koordiniert. Hierbei arbeiten Wissenschaftler von fünf Forschungsinstituten aus Deutschland,



▲ Das Schema rechts zeigt, wie die Rührscheibe das Wasser in Rotation versetzt und dadurch einen Druckgradienten (rote Linie) an der Sedimentoberfläche erzeugt. Der Druckgradient treibt das Wasser durch den Sand entlang gekrümmter Bahnen (schwarze Linien).

Polen, den Niederlanden und Dänemark zusammen. Sie alle wollen wissen, welche Rolle die sandigen Küstenzonen der Ozeane beim Stoffumsatz in Küstengewässern spielen. „Wir interessieren uns dabei vor allem für die Bedeutung der Sande im **globalen Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf**," erläutert Cook.

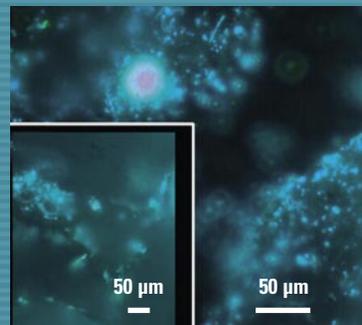
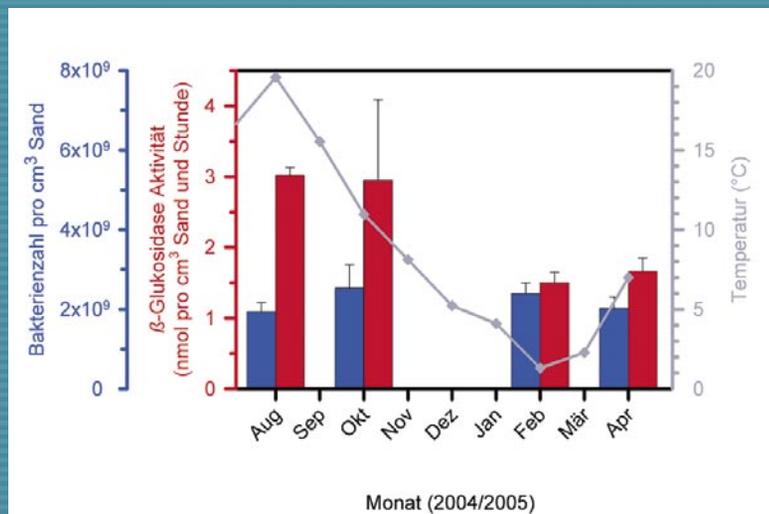
WAS TREIBT DAS WASSER DURCH DEN SAND

Wie fast alle am Projekt Beteiligten, betreibt der Biogeochemiker aus Australien dazu Forschung im Labor sowie Feldforschung vor Sylt und der Ostseehalbinsel Hel in Polen. „Mit gut zwei Dutzend Forschern waren wir im Frühjahr drei Wochen lang auf Sylt," erzählt Cook. „Wir haben unsere Geräte bei eisigen Temperaturen im Wasser aufgebaut. Und dann hieß es alle drei Stunden – auch nachts – ab ins Wasser und Daten sammeln. Das war hart!" Cook und seine Kollegen installierten unter anderem Rührkammern am Meeresgrund (**Abb. D**). Damit können sie den Austausch von Kohlendioxid, Sauerstoff und verschiedenen anorganischen Nährstoffen (z. B. Phosphat und Nitrat) zwischen dem Sand und dem darüber stehenden Wasser messen. Um die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers durch den Sand zu variieren, wird das Wasser mit einer Rührscheibe in

Rotation versetzt. Das führt dazu, dass der Druck, der am Rand der Kammern auf die eingeschlossene Sandoberfläche wirkt, im Vergleich zur Kammermitte leicht erhöht ist. Die Druckdifferenz und das Strömungsmuster des Porenwassers entsprechen weitgehend den Verhältnissen, die man auch an natürlichen Unebenheiten des Bodens wie Rippeln oder Hügeln messen kann.

Mit den Kammern konnten die Wissenschaftler ihre Vermutung bestätigen, dass der Stoffumsatz im Sand erheblich davon abhängt, wie hoch die Druckdifferenz ist, also wie schnell das Wasser durch den Sand gepumpt wird – und damit wie wirkungsvoll die Mikroorganismen, die zwischen den Sandkörnern leben, mit Nährstoffen versorgt werden. „Wir können erstmals quantitativ ermitteln, wo die Freisetzung und wo die Fixierung von Kohlendioxid in den Sanden überwiegt, das heißt, zu welcher Jahreszeit und in welchen Küstengebieten CO₂ produziert oder verbraucht wird," stellt Antje Boetius fest.

Interessant ist in diesem Zusammenhang auch ein Vergleich mit anderen Ökosystemen. Um die Produktivität eines solchen zu messen, errechnen die Wissenschaftler, wie viel Kohlenstoff pro Quadratmeter und Jahr dort umgesetzt wird. Für einen der



Links: Während die Bakterienzahlen relativ konstant sind, zeigen sich starke Unterschiede in der Aktivität der Mikroorganismen. Die höchste Enzymaktivität (Spaltung von beta-Glukose) wurde im Spätsommer bei hohen Wassertemperaturen gemessen. Oben: Mit einem Fluoreszenzfarbstoff angefarbte Bakterien auf der Oberfläche von Sandkörnern.

→ Spitzenreiter, den Regenwald, liegt dieser Wert bei etwa 1.000 Gramm; in der Wüste werden dagegen nur 90 Gramm umgesetzt. Die Organismen im Sand setzen immerhin etwa 100 bis 200 Gramm um, vergleichbar mit einem Sojabohnenfeld, in dem zirka 260 Gramm Kohlenstoff pro Quadratmeter für das Wachstum der Bohnen benötigt werden. „Die Sande sind damit wesentlich produktiver, als man bis vor kurzem angenommen hat,“ so Perran Cook. „Und dementsprechend wichtig sind sie auch für den globalen Kohlenstoffkreislauf und für das Klima.“

In welchem Maße die Aktivität der Mikroorganismen im Sand von der Jahreszeit abhängt oder davon, wie tief die Organismen im Meeresboden leben, untersucht die Bremer Mikrobiologin Simone Böer. Sie fährt viermal im Jahr nach Sylt und sticht an ver-

▼ Unterwasser-Probennahme eines großen Sedimentkerns für Laborexperimente



schiedenen Stellen 15 Zentimeter lange Sedimentkerne aus dem Sandboden (Abb. F). Im Labor werden diese in drei jeweils 5 Zentimeter lange Abschnitte geteilt und dann untersucht, wie schnell die darin enthaltenen Bakterien verschiedene Nährstoffe verarbeiten. Dazu setzt die Mikrobiologin dem Sediment spezielle Substanzen zu, die mit Fluoreszenzfarbstoffen markiert sind: Für jedes Molekül, das von den Bakterien abgebaut wird, wird ein Molekül Farbstoff frei. Die Wissenschaftlerin bestimmt dann die Aktivität, indem sie das Farbstoffsignal in Abhängigkeit von der Zeit misst (Abb. E).

MIKROBEN LIEBEN DEN SOMMER

Das Ergebnis: Die Aktivität ist im Sommer viel höher als im Winter. Auch die Gesamtzahl der Bakterien pro Milliliter Sand wird bestimmt. Dazu müssen diese zunächst mit einem Ultraschallgerät vom Sand gelöst werden. „Mehr als 90 Prozent der Bakterien haften fest auf den Sedimentkörnern,“ weiß Simone Böer. Typischerweise finden sich etwa 10⁹ Bakterien pro Milliliter – die Zahlen im Sommer sind nur leicht erhöht. „Inwieweit die höhere mikrobielle Aktivität von den Lichtverhältnissen, der Temperatur oder anderen Faktoren abhängt, ist noch unklar“, sagt die Mikrobiologin. In Zukunft wollen Böer und ihre Kollegen am Bremer Max-Planck-Institut möglichst viele der vorherrschenden Bakteriengruppen identifizieren und untersuchen, ob bestimmte Populationen während unterschiedlicher Jahreszeiten besonders aktiv sind.

Diese und andere Forschungsergebnisse rund um das Thema Sande werden nicht nur der Klimaforschung zugute kommen. Auch der Küstenschutz soll von den Bremer Arbeiten profitieren. Küstengebiete werden als Erholungs- oder Fischfanggebiete von den Menschen erheblich in Anspruch genommen. Und auch durch Ölförderung und Windparks, die die Küsten zunehmend prägen, wird die Umwelt belastet. Schließlich ist die Konzentration der Schadstoffe, die über Flüsse ins Meer gespült werden, in Küstenregionen relativ hoch. Die Bremer Max-Planck-Forscher wollen deshalb dazu beitragen, Frühwarnsysteme zu entwickeln, die anzeigen, wann das Ökosystem Küstensande in Gefahr ist. „Das Ziel sind einfache mikrobiologische Tests, die regelmäßig durchgeführt werden. Wenn diese dann ungewöhnliche Ergebnisse liefern, besteht Handlungsbedarf,“ so Simone Böer. Übrigens sind Mikroorganismen nicht nur empfindliche Sensoren für ökologische Störungen; sie sind auch der Anfang einer langen Nahrungskette – an deren Ende der Mensch steht.

Schlagwörter: Küstensande, Filtersystem, Treibhausgas, Porenwasser-Advektion, globaler Kohlenstoff- und Stickstoffkreislauf

Internet: www.eu-cosa.org/de
www.wattenmeer-nationalpark.de

DIE „MAX“-REIHE

auch unter www.max-wissen.de – der Link zur Forschung für Schüler und Lehrer

Hier finden Sie Hintergrundinformationen und didaktisches Material zu den jeweils zweimal im Jahr erscheinenden Ausgaben von BIOMAX, GEOMAX und TECHMAX. Weitere Exemplare können Sie kostenlos bestellen bei: