



# Küstenforschung

An der Grenze zwischen Meer und Land







Foto: U. Nettelmann



# Inhalt

Vorwort	5
Einleitung	7
<b>Nordsee und Polarregionen</b>	
<b>Untersuchungsgebiete der Küstenforscher</b>	
Helgoland - Schatzkammer der Artenvielfalt	10
Sylt - Wandel, Watt und Weltnaturerbe	12
Polarregionen - Schlüsselgebiete des Klimageschehens	14
<b>Vom Fressen und gefressen werden</b>	
<b>Marine Nahrungsnetze</b>	
Plankton à la carte	18
Extrawurst nach Planktonart	20
Vorwärts in die Vergangenheit	21
<b>Ausdauer gefragt</b>	
<b>Langzeitmessungen belegen Wandel im Ökosystem</b>	
Nordsee auf neuem Kurs?	24
Vibrionen mögen's warm	26
Detektivarbeit im Mikrokosmos	27
<b>Hotspots des Klimawandels</b>	
<b>Die Polarregionen</b>	
Schmelzende Gletscher und trübes Wasser	30
Tauender Permafrost erwacht zum Leben	32
Arktische Küsten auf dem Rückzug	33
<b>Aus der Luft, an Land und unter Wasser</b>	
<b>Methoden moderner Meeresforschung</b>	
Waldspaziergang unter Wasser	36
Die Mathematik des Watt-Speiseplans	38
Das tauch(g)t was	39
<b>Raus aus dem Elfenbeinturm</b>	
<b>Forschung für Studierende, Schüler, Politik und Gesellschaft</b>	
Forschung zu Gast	42
Und bitte! Meeresforschung fürs Fernsehen	44
Mit Rat und Tat: Brücke zur Öffentlichkeit	46

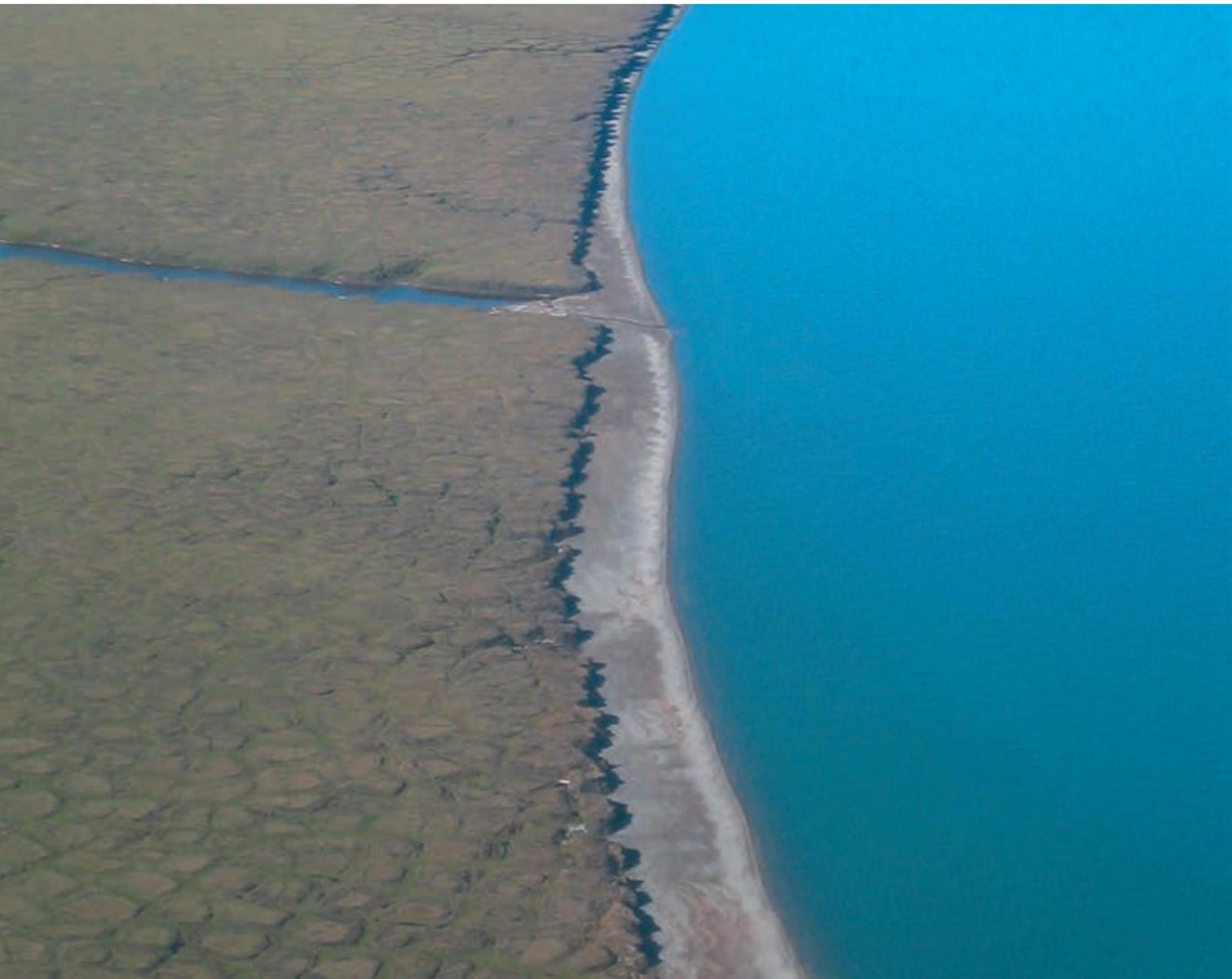


Foto: H. Lantuit

## Vorwort



Etwa 20 Prozent aller Menschen lebt weniger als 30 Kilometer von einer Küste entfernt und 80 Prozent der Großstädte weltweit liegen an Küsten. Fische und andere Meeresfrüchte sind wichtige Nahrungsmittel; die Ozeane sind zugleich Transportweg und Lagerstätte von Rohstoffen und die Küsten sind neben Siedlungs- auch Erholungsraum. Die Bewohner der Meere - also unsere Nachbarn auf Wasserseite - lassen sich trotz der räumlichen Nähe nur selten blicken: Bis auf ein paar Krebse oder angespülte Algen am Strand, die Beute eines Anglers oder einen Seehund bleiben die meisten Organismen unter der Wasseroberfläche verborgen. Genau das macht die Faszination für das Leben im Meer aus.

So groß das Interesse an den Lebewesen und Vorgängen in den Meeren „vor unserer Haustür“ ist, unser Verständnis der Küsten-Ökosysteme reicht noch nicht aus, um ihre vielfältigen komplexen Zusammenhänge und Wechselwirkungen ausreichend zu verstehen. Nachhaltigkeit bei der Nutzung der Küstengewässer setzt jedoch ein möglichst weites, grundlegendes Verständnis voraus, denn nur auf einer fundierten Basis lassen sich die Folgen unseres Handelns abschätzen und potentielle negative Auswirkungen vermindern. Diese Aufgabe nehmen die Küstenforscherinnen und -forscher des Alfred-Wegener-Instituts für Polar- und Meeresforschung in der Helmholtz-Gemeinschaft (AWI) gerne an. Eng vernetzt mit universitären und außeruniversitären Einrichtungen auf nationaler und internationaler Ebene bringen sie die Wissenschaft voran.

Sie kombinieren Expertise aus Biologie, Physik, Geologie und Polarwissenschaften, um beispielsweise klimarelevante Fragen, die Funktionsweise von Nahrungsnetzen, neue Küstenhabitats und ökologische Langzeitentwicklungen zu untersuchen. Mit den Standorten auf Helgoland und Sylt sowie in Bremerhaven und Potsdam haben viele unserer Küstenforscher einen direkten Zugang zu ihrem Untersuchungsgebiet. Alternativ nutzen sie die Infrastrukturen und die jahrzehntelange logistische Erfahrung des AWI für Expeditionen an die Küsten der Polarregionen. Das AWI legt großen Wert darauf, Informationen für verschiedene Zielgruppen nutzungsorientiert aufzuarbeiten. So bietet das Erlebniszentrum Naturgewalten Sylt interessierten Besuchern einen direkten Einblick in den Lebensraum Wattenmeer. Das AWI-Nordseebüro entwickelt gemeinsam mit Politik und Umweltverbänden Strategien für einen nachhaltigen Umgang mit der Nordsee.

Diese Broschüre möchte Sie einladen, auf unterhaltsame Art die Forschung an den Küsten von Nordsee und Polarregionen besser kennenzulernen. Tauchen Sie ein in die komplexen Gemeinschaften und Ökosysteme im Meer vor unserer Tür. Viel Spaß beim Lesen wünscht

Prof. Dr. Karin Lochte  
Direktorin Alfred-Wegener-Institut



Foto: L. Tadday



## An der Grenze zwischen Meer und Land

An der Küste vermischen sich die „Elemente“ Wasser und Erde und haben in diesen Grenzregionen eine große Vielfalt von Strukturen und Lebensräumen geschaffen: In den Polargebieten entstehen steile Permafrostküsten und Gletscherzungen erstrecken sich bis in den Ozean. Das Wattenmeer prägt weite Bereiche der Nordseeküste, aber auch Felsküsten und andere feste Strukturen wie Hafenanlagen oder Unterwasserbauwerke finden sich in den gemäßigten Breiten.

Wo Wasser auf Land trifft, herrscht eine große Dynamik, an die sich die Meeresbewohner im Laufe der Evolution angepasst haben. Die Hydrographie strukturiert über physikalische und chemische Variabilität die biologische Vielfalt in Küstengewässern. Zusätzlich prägt eine hohe Saisonalität die gemäßigten und polaren Breiten durch schwankende Temperatur-, Licht- und Nährstoffverhältnisse. All dies führt dazu, dass die Küstenzonen zu den produktivsten Regionen der Erde gehören. Zusätzlich verändern sie sich derzeit in rasantem Tempo: Tiere wandern in die Nordsee ein, fühlen sich in warmen Wintern wohl und besiedeln Wattflächen im UNESCO Weltnaturerbe. Quallen-Schwärme tauchen vermehrt auf und übernehmen von Fischen im Nahrungsnetz die Rolle der obersten Räuber. Und auch neue pathogene Keime können im wärmeren Wasser auftreten und müssen erfasst werden, damit wir ein vorbeugendes Verständnis zu möglichen Krankheitserregern erlangen. Arktischer Permafrost taut und setzt das Klimagas Methan frei - mit bisher unzureichend erforschten Rückkopplungseffekten auf das globale Klimageschehen.

Wir Küstenforscher am Alfred-Wegener-Institut möchten Veränderungen erkennen, dahinter liegende Mechanismen aufdecken und mögliche zukünftige Szenarien skizzieren. Neben der Neugier nach wissenschaftlicher Erkenntnis treibt uns zusätzlich die Faszination für den Lebensraum Küste an, denn wir sind selbst ein Teil davon.

Nahrungsnetze spielen in unserer Forschung eine wichtige Rolle. Das Kapitel „Vom Fressen und Gefressen werden“ erläutert an aktuellen Beispielen Veränderungen in der Nahrungsverfügbarkeit und -qualität. Dies startet bei mikroskopisch kleinen Lebewesen, betrifft am Ende über die Bestandsentwicklung von Fischen aber auch den Menschen. Das Kapitel „Ausdauer gefragt“ widmet sich den Langzeitserien. Sollen natürliche Schwankungen von Langzeittrends unterschieden werden, bedarf es nämlich eines langen Atems, und den haben wir: Die Langzeitdatenreihe Helgoland Reede besteht seit 50 Jahren und ist damit die längste Phytoplankton-Zeitreihe der Welt. Die Polarregionen sind „Hotspots des Klimawandels“, denn sie verändern sich besonders rasch und stark. So können sie als Frühwarngebiete für den Klimawandel dienen, beeinflussen ihrerseits aber auch das „System Erde“ über die Wechselwirkungen zwischen Land, Ozean, Biosphäre, Atmosphäre und Eismassen.

Küstenökosysteme sind so komplex wie das Wetter - schwer zu verstehen, kompliziert aufzunehmen und voller Geheimnisse. Dieses spornt uns Küstenforscher an. In dieser Broschüre möchten wir unseren Forschungsalltag mit dem Leser teilen. Wir zeigen, wie wir mit Pütz und Netz, Unterwasserkameras, komplexen Messgeräten in Wasser, Schlamm oder aus der Luft unsere Küstenökosysteme zu entschlüsseln versuchen. Alle Wissenschaftsdisziplinen sind über diese Themen verbunden, damit wir den effektivsten Forschungszusammenschluss erreichen und die großen Küstenfragen beantworten können.

Reisen Sie mit uns von Pol zu Pol, kommen Sie mit auf Schiffe und in Schulklassen und lernen Sie so unsere vielfältige Forschung kennen!

Viel Spaß auf der Reise wünscht

Prof. Dr. Karen Wiltshire  
Stellv. Direktorin Alfred-Wegener-Institut

An aerial photograph showing a vast expanse of blue water meeting a dark, sandy beach. The water's surface is textured with ripples and reflections, while the beach shows intricate patterns of sand and small pools of water. The overall scene is captured from a high angle, looking down at the coastline.

# Nordsee und Polarregionen

Untersuchungsgebiete  
der Küstenforscher





Foto: R. Kuhlenskamp

## Helgoland - Schatzkammer der Artenvielfalt

Als Deutschlands einzige Hochseeinsel ist Helgoland nicht nur Rastplatz für tausende Zugvögel und Standort seltener Pflanzen. Das Felswatt und die Felslandschaft unter Wasser beherbergen die reichste marine Tier- und Pflanzenwelt der deutschen Küste. Veränderungen der Lebensgemeinschaften lassen sich hier besonders gut studieren. (Prof. Dr. Heinz-Dieter Franke)

Mitten in der Deutschen Bucht, etwa 50 bis 60 Kilometer vom Festland entfernt, bildet die Insel Helgoland ein ökologisches Kleinod, das Meeresforscher seit bald zwei Jahrhunderten beschäftigt. So begründete der Naturforscher Johannes Müller im Jahr 1846 auf Helgoland die Planktonforschung. Auch der Evolutionsforscher Ernst Haeckel studierte die Meerestiere von der Insel aus. Die Gründung der „Königlich-Preußischen Biologischen Anstalt Helgoland“ verstetigte im Jahr 1892 die Meeresforschung.

In der von Weichböden aus Sand und Schlack dominierten südöstlichen Nordsee erstreckt sich die bizarre Felslandschaft Helgoland als geologische Besonderheit über etwa 40 Quadratkilometer. Nur ein kleiner Teil davon ragt wie die Spitze eines Eisberges über den Wasserspiegel hinaus. Der weitaus größte Teil bleibt ständig von Wasser bedeckt, wissenschaftlich wird dieser Bereich als Sublitoral bezeichnet. Den Übergang bildet die felsige Gezeitenzone (Eulitoral), in der das Wasser im Rhythmus von Ebbe und Flut kommt und geht. Die Lebensbedingungen für Flora und Fauna im freien Wasser und am Meeresboden stehen einerseits noch deutlich unter dem Einfluss der Festlandsküste: Süßwasser und Sedimente gelangen über die Flüsse in die Nordsee. Andererseits beeinflusst Wasser aus dem Atlantik die Region, so dass die Lebensbedingungen um Helgoland herum fast schon marin sind.



Großalgen benötigen einen festen Untergrund, an den sie sich anheften können. Der Helgoländer Felsen erstreckt sich auch unter Wasser und bildet das einzige größere natürliche Hartsubstrat in der Deutschen Bucht.

Foto: I. Bartsch

### Lebensraum für hunderte Arten

Da an Helgolands Küsten sehr unterschiedliche Lebensräume direkt nebeneinander liegen, kann hier auf engstem Raum eine ungewöhnlich vielfältige Tier- und Pflanzenwelt existieren. Das macht Helgoland zu einer „Oase“ mariner Artenvielfalt. Allein am felsigen Meeresboden leben etwa 700 Arten der gut sichtbaren Makrofauna, wie Schnecken, Muscheln, Borstenwürmer und Krebse. Fast 200 größere Tierarten besiedeln das Extrembiotop der Gezeitenzone, in der sich alle wichtigen Umweltfaktoren täglich zweimal schnell und drastisch ändern.



### Bluehouse: Wissenschaft live erleben

Wer würde nicht gern einmal wie ein Wissenschaftler in die geheimnisvolle Weite des Ozeans abtauchen? Auf Helgoland soll dieser Traum wahr werden. Das Alfred-Wegener-Institut möchte das Helgoländer Forschungs- und Lehraquarium zu einer öffentlichen Forschungslandschaft umbauen. Im sogenannten „Bluehouse“ sollen Besucher künftig das Ökosystem Nordsee gemeinsam mit den Forschern der Biologischen Anstalt Helgoland entdecken können: Live an der Auswertung von Forschungsdaten teilnehmen oder selbst ein meereswissenschaftliches Experiment wagen. Gäste mit Taucherschein könnten zukünftig mit den Forschungstauchern die Unterwasserwelt Helgolands erkunden.



Fotos: U. Nettelmann

Auf den Hartböden wachsen etwa 300 Arten von Großalgen. Nur hier finden sie den festen Untergrund, auf dem sie sich verankern können. Der Algentteppich erstreckt sich von der oberen Gezeitenzone bis in etwa 15 Meter Wassertiefe – soweit das Licht im trüben Nordseewasser reicht. Die Großalgen produzieren einen erheblichen Teil der lokalen Biomasse und bilden entweder als ständiger Lebensraum oder als vorübergehende Kinderstube und Futterkammer die Existenzgrundlage vieler Tierarten.

Im freien Wasser herrscht je nach Jahreszeit ein auffälliges Kommen und Gehen von Bakterien, winzigen Algen, mikroskopisch kleinen Tieren und den Larven vieler Bodentiere. Wir wissen zwar, dass diese Prozesse vom Nährstoffangebot, von Licht, Temperatur, Strömungen sowie Räuber-Beute- und Konkurrenzbeziehungen abhängen, aber viele Details sind noch unerforscht.

### Prozesse verstehen, Trends erfassen

Schadstoff- und Nährstoffeinträge, der Klimawandel, die Einschleppung fremder Arten und schließlich die direkten Eingriffe des Menschen, beispielsweise die Fischerei, verändern zunehmend die marinen Lebensgemeinschaften. Aufgrund der speziellen ökologischen Situation und dank umfangreicher historischer Vergleichsdaten eignet sich Helgoland besonders gut, um solche Veränderungen zu erfassen. Nur wenn wir den Ist-Zustand der physikalisch-chemischen Messgrößen, der Vielfalt und der Häufigkeiten einzelner Arten sowie natürliche Schwankungen kennen, lassen sich in langjährigen Beobachtungsreihen tatsächliche Trends erfassen und von kurzfristigen Schwankungen unterscheiden. Um mögliche Ursachen solcher Trends erkennen und begründete Vorhersagen der Folgen treffen zu können,

müssen zunächst andere Prozesse verstanden werden: die ökologischen Rollen zumindest der wichtigsten Arten, ihre Wechselwirkungen untereinander sowie ihre Abhängigkeiten von verschiedenen Faktoren. Dies erfordert aufwändige Freilandbeobachtungen und Laborexperimente.

Nicht einmal in einem so gut untersuchten Gebiet wie Helgoland sind alle Arten bis heute vollständig dokumentiert. Am besten kennen wir die Biodiversität und die räumliche Verteilung der Biotope im Felswatt – diese Zone ist am besten zugänglich. Eine ähnlich gründliche Erfassung der tiefer im Meer gelegenen Lebensräume erfordert den Einsatz von Forschungstauchern und Probennahmen von Forschungsschiffen aus. Molekularbiologische Methoden fördern zudem bisher verborgene Arten zu Tage. Diese Methoden werden es uns künftig auch ermöglichen, die wichtigen, im freien Wasser schwimmenden Frühstadien der Bodentiere bis auf Artniveau zu bestimmen, was bisher nicht möglich ist. Das eröffnet der ökologischen Forschung neue Perspektiven, denn so können Modelle über die Funktionen der Lebewesen in Ökosystemen verfeinert werden.

Manche Veränderungen, wie die der Wassertemperatur, der saisonalen Dynamik des Planktons oder des Artenspektrums, sind durch jahrzehntelange systematische Forschung für das Gebiet Helgoland gut dokumentiert. Darüber hinaus aber gibt es selbst auf einfache Fragen noch keine Antworten: Warum verschwindet eine Art? Was bedeutet es für eine Lebensgemeinschaft, wenn eine Art neu dazu kommt? Der rasche ökologische Wandel an den Küsten offenbart einen immensen Bedarf an ökologischer Grundlagenforschung.



Mit dem Zählrahmen im trocken gefallenen sommerlichen Felswatt (oben) oder mit dem Netz bei herbstlichen Temperaturen direkt im Wasser (unten): AWI-Forscherinnen und Forscher haben auf Helgoland ihre Untersuchungsobjekte in unmittelbarer Nähe.  
Fotos: U. Nettelmann



Foto: P. Antkowiak

## Sylt - Wandel, Watt und Weltnaturerbe

Rund 150 Jahre Forschung haben den Wandel im Wattenmeer dokumentiert. So verstehen wir heute den Spannungsraum zwischen Meer und Land als weltweit einzigartiges sensibles System. Im globalen Kontext moderner Forschung treten nun neue Fragen an die Wissenschaft auf. Ein Blick zurück und nach vorn. (Prof. Dr. Karsten Reise)



Langschnäbelige Knutts haben sich auf kleine Muscheln und Schnecken im Wattboden spezialisiert. Haben sie genug gefressen, fliegen sie weiter nach Sibirien, um dort zu brüten.



Pazifische Austern haben sich im Wattenmeer stark vermehrt. Studenten sammeln sie für Experimente. Sie wollen herausfinden, ob Miesmuscheln sich mit der neuen Konkurrenz arrangieren können. Fotos: K. Reise

Die Sylter Fischer schlugen Alarm. Der Austernfang lieferte immer weniger Ertrag. Im Jahr 1869 wandten sich die Fischer deshalb an den Kieler Zoologen Karl Möbius, er möge ein Gutachten erstellen. Der Naturkundler entlarvte einseitigen Raubbau als Grund für den Muschelschwund, damals eine absolut neue Idee. Wollte man die Austernbestände nachhaltig nutzen, schrieb Möbius, sei die gesamte „Lebensgemeinschaft“ einzubeziehen. Die „Biozönose“ war geboren – der erste wissenschaftliche Meilenstein rund um das Sylter Watt und ein bis heute gültiges biologisches Konzept.

Fünzig Jahre später haben dann vier weitere Forscher Maßstäbe gesetzt. Die Biologen Arthur Hagmeier und Rudolf Kändler von der Biologischen Anstalt Helgoland (BAH) begannen mit der systematischen Erforschung des Watts. Sie erfassten nicht nur, was sich an Leben am und im Boden tummelt, sondern auch, wie viel von welcher Art. Zugleich fertigten Wilhelm Nienburg und Erich Wohlenberg Karten zum Vorkommen von Seegräsern und Bodentieren an. Zusammen schufen sie ein komplettes Bild des Ökosystems.

Damit hatte sich die Forschung vor Sylt fest etabliert. Sie hatte im wahren Wortsinn ein Zuhause bekommen: Aus einem Austernlabor von 1924 wurde 1937 die Wattenmeerstation Sylt. Deren kontinuierliche Aufzeichnungen geben der heutigen Forschung eine weitreichende zeitliche Dimension: Aktuelle Daten zeigen im Vergleich, wie sehr sich der Küstenraum stetig verändert hat und voraussichtlich weiter ändern wird.

### Das Watt im Wandel – Den Wandel im Blick

Gewandelt hat sich aber nicht nur das Watt, sondern auch unsere Sicht darauf. Eine jämmerliche Ödnis, so beschrieben Reisende das Gebiet einst. Die Schifffahrt fürchtete die gefährlichen Untiefen, die Menschen beklagten die Kargheit des Lands. Außer Austern gab es nichts von großem Wert. Sandbänke, Schlick und Salzwiesen versprachen erst Ertrag, wenn ein Deich sie vom Meer trennte und so Weiden und Ackerland schuf – immer wieder eingerissen von stürmischer Flut. Heute sehen wir das Watt dagegen umgekehrt als Lebensspender an: zum Beispiel als Kinderstube von Fischen und Energietankstelle für Zugvögel. Nirgendwo sonst machen so große Schwärme Station, haben internationale Vergleichsstudien gezeigt.

Das hat auch gesellschaftlich und politisch überzeugt. Die Niederlande, Dänemark und Deutschland schützen das Gebiet gemeinsam gegen neue Eindeichung, Verschmutzung, Überfischung und Jagd mit einem gemeinsamen Managementplan, dem Nationalpark und Biosphärenreservaten. Diese Weitsicht wurde belohnt. Die UNESCO erklärte das Wattenmeer 2009 zum Weltnaturerbe – eine Auszeichnung, die nun ihrerseits wiederum die Küstenforschung inspiriert.

Bisher hatten Experimente und Messungen vornehmlich im Blick, was direkt vor Ort im Wattenmeer geschieht: wie die Naturgewalten das Watt formen, wie die Beziehungen zwischen Wellen, Schlickboden und Salzwiesen funktionieren, wel-

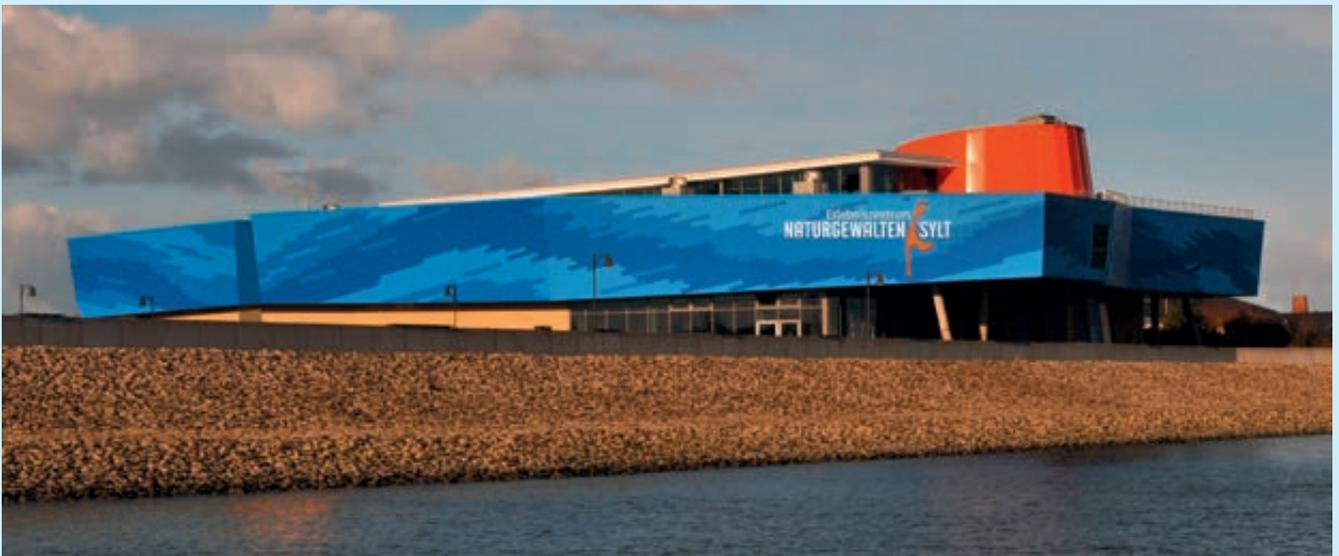


Foto: V. Frenzel

### Gewaltige Natur

Wind wütet und haushohe Fluten verschlingen Meter um Meter Land ... Bei „Naturgewalt“ denken wir oft an große Zerstörung. Doch die Dimension ist eine Frage der Sicht. Für winzige Organismen im Sandlückengefüge oder Quallen ist bereits eine seichte Welle gewaltig. Und für eine Miesmuschel ist Gewalt der Seestern, der sie frisst. Die AWI-Forschung und das „Erlebniszentrum für Naturgewalten Sylt“ betrachten nichts isoliert oder als gut oder schlecht, sondern alles mit wechselndem Blick. Auch den Menschen: Er ist nicht nur Spielball der physikalischen Kräfte der Natur, er ist auch selbst eine Gewalt. Wir fischen zum Beispiel die Ozeane leer oder stellen Windparks ins Meer.



Sturmfluten zeren an den Wattufeln, werfen Muscheln auf den Strand und wirbeln Vögel über das Meer. Nichts ist danach wie vorher. Doch die Dynamik ist wichtig, damit das Wattenmeer bleibt wie es ist. Foto: K. Reise

ches Tier welches frisst oder wodurch und wie stark der Mensch all das beeinflusst. Nun gilt es darüber hinaus, dieses Wissen in einen weltweiten Zusammenhang zu stellen. Was macht das Wattenmeer so einmalig? Warum gibt es nirgends sonst so beeindruckende Vogelschwärme am Küstenhimmel? Und gibt es auch anderswo über tausend Arten Kleinlebewesen wie im Lückengefüge der Sandkörner am Strand?

### Alles beim Alten - Nichts wie gehabt

Und es gibt noch eine Herausforderung, die für die ganze Welt Bedeutung hat: der Wandel des Klimas. Er stellt die Schicksalsfrage des Watts: Wird es durch den ansteigenden Meeresspiegel für immer untergehen? In hundert Jahren ändert sich das Niveau des Wattbodens nur um wenige Zentimeter. Das Meer aber könnte sich bis zum Ende dieses Jahrhunderts um etwa einen Meter heben - zu viel, als dass die Wattböden mitwachsen könnten.

Bestätigt sich das, geht es um Lösungen mit, nicht gegen die Natur. Nicht neue, starre Deich-

mauern, sondern Sandimporte aus der Nordsee könnten die Inseln und das Küstenland schützen und auch das Weltnaturerbe erhalten. Die Aufschüttungen könnten das Wattenmeer zwar nicht konservieren, wie es einmal war. Aber das entspricht auch nicht mehr dem modernen wissenschaftlichen Gedanken vom Schutz der Natur. Das Watt würde sich ändern, könnte jedoch mit dem globalen Wandel Schritt halten und bliebe so weiterhin ein Stück intakte, grandiose Natur. Genau das macht heute das Einkommen und die Zukunft der Nordseeküste aus.

Auch die Aufgabe der Küstenforschung auf Sylt bleibt, nur wird sie anders ausgelegt: Sie soll die Zusammenhänge der Naturdynamik verstehen - nicht damit ein einzelnes Segment des Wattenmeeres, wie einst die Austernzucht, besser (aus-)genutzt werden kann, sondern um künftige Entwicklungen in dem empfindlichen System rechtzeitig sichtbar zu machen und das Küstenmanagement beratend begleiten zu können, die Wünsche der Menschen und die Natur behutsam in Einklang zu bringen.



Foto: M. Fritz

## Polarregionen - Schlüsselgebiete des Klimageschehens

Jenseits der gemäßigten Breiten gen Nordpol wird es ungemütlich: Schnee, Eis und klirrende Kälte bis minus 50 Grad Celsius schaffen an den arktischen Küsten extreme Lebensbedingungen. Doch der hohe Norden verändert sich: Die Luft wird wärmer und das Meereis schmilzt. Ist diese Entwicklung positiv oder negativ? AWI-Forscher wollen wissen, wie die polaren Küsten sich künftig entwickeln werden.

(Dr. Paul Overduin, Dr. Ingeborg Bussmann)



Sediementabbruch an der Permafrostküste.



Schmelztümpel im Lena-Delta.  
Fotos: B. Oppermann

Die arktischen Küsten sind Lebensraum für Mensch, Fauna und Flora. Wie alle Küsten sind sie zugleich Drehscheibe der Wirtschaft und des Handels - mit steigender Tendenz. Zunehmend entdecken Touristen auch den kalten Norden als spannendes Reiseziel. Aber die arktischen Küsten sind noch etwas anderes: ein Schlüsselgebiet des Klimageschehens. Denn sie reagieren empfindlicher auf die globale Erwärmung als die Küsten in den gemäßigten Breiten. Umgekehrt können sich Veränderungen in der Arktis gravierend im globalen Klima niederschlagen, nicht zuletzt aufgrund der Dimension der arktischen Küsten. Über etwa 400.000 Kilometer schlängelt sich das Land an den nördlichen Meeren entlang - das entspricht der zehnfachen Länge des Äquators.

### Tauwetter im ewigen Frost

Zwei Drittel der arktischen Küsten bestehen nicht aus Fels, sondern aus dauerhaft gefrorenem Weichboden, dem Permafrost. Im Permafrost der nördlichen Hemisphäre lagert etwa die Hälfte des weltweit unterirdisch schlummernden Kohlenstoffs. Taut der Boden im Zuge der Klimaerwärmung auf, gelangen Kohlendioxid und Methan in die Atmosphäre. Diese Gase verstärken

den Treibhauseffekt, was wiederum das Auftauen des Bodens beschleunigt.

Grundlegend sind inzwischen viele Prozesse auch in diesen schwer zugänglichen Regionen gut verstanden. Wenn es aber um ihre Quantifizierung geht - also wie viel Gas strömt wann und wo aus dem Boden heraus -, steht die Forschung noch auf recht dünnem Eis. Hier ist zunächst die Feldarbeit gefragt, wie im sibirischen Lena-Delta. Auf der kleinen Insel Samoylow betreibt das AWI seit 1998 gemeinsam mit russischen Partnern eine Forschungsstation. Von dort aus ziehen die Wissenschaftler ins Feld und aufs Wasser. Sie messen Bodentemperaturen und Auftautiefen, stülpen Messgeräte über den Boden und erfassen die austretende Menge Gas pro Fläche - immer wieder und möglichst lange, damit sich Entwicklungen und jahreszeitlich bedingte Schwankungen verfolgen lassen. Mikrobiologen und Biogeochemiker untersuchen, woher das viele Methan in der Lena und ihrem Delta kommt und wie schnell Bakterien daraus neue Biomasse herstellen. Zudem spüren die Forscher Veränderungen bei den wasserlebenden Organismen nach.

In dem großen EU-Projekt PAGE21 fließen die gewonnenen Daten nun verstärkt in globale Klimamodelle ein. Feldforscher, Betreiber von Langzeitobservatorien und Modellierer des AWI und von 17 europäischen Partnerinstituten gehen der Frage nach: Was genau passiert, wenn große Mengen des Kohlenstoffs aus den arktischen Böden in die Atmosphäre gelangen? Da der Permafrost mit all seinen Rückkopplungen in den Klimamodellen bislang wenig berücksichtigt ist, sind die Modelle häufig noch ungenau. Wir brauchen aber möglichst genaue Modelle. Schließlich bilden sie die Grundlage für die Entwicklung von Vermeidungs- und Anpassungsstrategien, mit denen wir dem Klimawandel begegnen wollen - und müssen.

Dazu gehört auch der Blick in den Meeresboden an den arktischen Küsten. Dort „schläft“ der sogenannte submarine Permafrost. Steigende Wassertemperaturen könnten ihn aber zum Tauen bringen. Beispielsweise in der westlichen Laptewsee, in Sibirien, ist der submarine Permafrost mit mittlerweile minus ein bis zwei Grad Celsius schon ziemlich warm. Jede weitere Erwärmung würde ihn aus dem Gleichgewicht bringen. Das birgt eine weitere Gefahr: Im Untergrund der arktischen Schelfmeere lagern Schätzungen zufolge gigantische 2 bis 65 Milliarden Tonnen Methan. Das Gas ist dort als Gashydrat gespeichert. Steigt die Wassertemperatur, können die Methanhydrate schmelzen. Methan löst sich aus dem Sediment heraus und kann sich durchs Wasser bis in die Atmosphäre hocharbeiten - ein enormer Klimafaktor. Wie stark Sediment und Wasser jedoch als Filter fungieren, ist noch nicht klar.

### Achtung, Rutschgefahr!

Tauender Permafrost - ob unter oder über Wasser - kann einen zweiten Prozess in der Arktis verstärken: die Küstenerosion. Besonders dramatisch abgetragen werden die Küsten in Sibirien, an der Laptew- und der Ostsibirischen See sowie in Alaska und Nordwestkanada an der Beaufortsee. In diesen Regionen zieht sich die Küste teilweise zwanzig Meter pro Jahr zurück. Die Zukunft riesiger Gebiete steht quasi am Abgrund. Und damit die Zukunft der Bevölkerung, der Wildtiere (beispielsweise Karibuherden) und vieler anderer Organismen etwa in den Süßwasserseen in Küstennähe.

Im Gegensatz zu den Küsten in den gemäßigten Breiten sind die Küsten der Arktis von November bis Mai gut geschützt. In dieser Zeit verhindert die Meereisdecke, dass der Wind Wellen an die Küste schickt. In den Sommermonaten aber können die Wellen die Küsten ungehindert „angreifen“. Treffen sie dabei auf tauenden Permafrost, haben sie recht leichtes Spiel. Sommerstürme las-

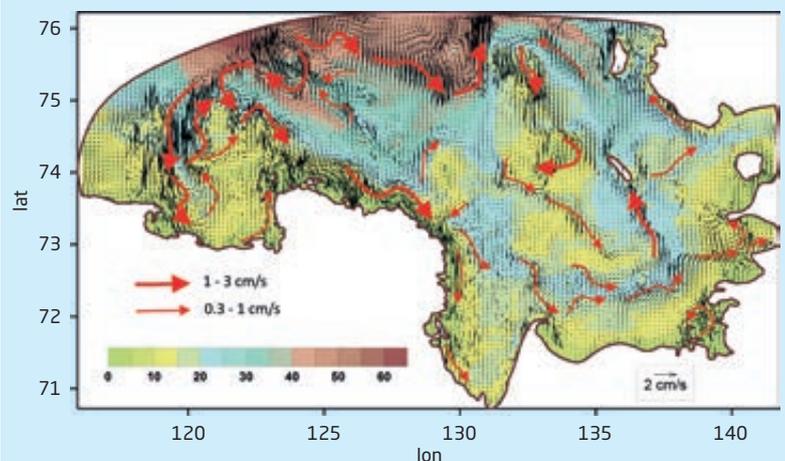
sen zudem den Meeresspiegel steigen und verleihen den Wellen noch mehr Kraft, sodass in gut zugänglichen Küstenbereichen große Mengen Sediment ins Meer rutschen. Geht das Meereis immer mehr zurück, steigt die Erosionsgefahr für die arktischen Küsten.

Wie der globale Klimawandel generell die Erosionsraten arktischer Küsten beeinflusst, ist allerdings noch nicht klar. Für dieses riesige Gebiet liegen bislang nur einige lokale und regionale Beobachtungsreihen vor - für sehr unterschiedliche Küstenlängen und Zeiträume. Aus unregelmäßigen Vor-Ort-Messungen, Luft- und Satellitenbildern lässt sich der zeitliche Ablauf von Küstenprozessen jedoch nur schwer rekonstruieren. Deshalb erfassen AWI-Wissenschaftler jetzt gemeinsam mit russischen und kanadischen Kollegen und mithilfe von Geländemodellen und hochaufgelösten Satellitendaten kontinuierlich die Erosionsraten und den Sedimenttransport an den arktischen Küsten. Nur mit mehr Forschung können wir Entwicklungen besser bewerten und Vorhersagen für die Zukunft treffen.



In Sibirien ist logistische Planung essentiell: Die nächste Werkstatt ist hunderte Kilometer entfernt.  
Foto: B. Oppermann

Die Residualzirkulation der gemeinsamen Beiträge von M2, S2, K1 und O1 Gezeiten (cm/s) über der Bathymetrie (m)



### Mathematisches Modell: Vom Dauerfrost zum Schmelzregime

Die physikalischen Parameter im Lena-Delta ändern sich stark: Der Wasserstand des Flusses erreicht sein Maximum immer früher im Frühling, die durchschnittliche Wassertemperatur im Sommer steigt und das Eis auf der Lena ist im Winter dünner. Dies muss in die globalen ozeanografischen Klimamodelle einbezogen werden. Hierzu entwickelt die Mathematikerin Vera Fofonova ein Modell speziell für diese Region. Es setzt unter anderem die Dynamiken von atmosphärischen Antrieb, Temperatur, Salzgehalt, Wasserstand miteinander in Beziehung und es berücksichtigt, wie die Tide in der Laptewsee die Durchmischung des Flusswassers beeinflusst. Hierzu wird die Lena-Delta-Region an der Laptewsee theoretisch in elf Tiefenschichten mit je 250.000 Datenpunkten unterteilt. Aus den Datenunterschieden zwischen den Punkten errechnet das Modell, welcher Parameter sich wo genau im Fluss wie ändert. Derzeit speist Fofonova das Modell mit allen verfügbaren Werten zu den Gitterpunkten. Die Berechnungen daraus helfen, die Rolle jedes einzelnen Parameters sowie die Auswirkungen auf die Biologie besser zu verstehen.



# Vom Fressen und Gefressen werden

Marine Nahrungsnetze





Mikroskopische Aufnahme von Dinoflagellaten der Gattung *Dipllopsalis*. Foto: M. Loeder

## Plankton à la carte

Der Speiseplan im Meer sieht vordergründig einfach aus: Die Größeren fressen die Kleineren, diese die noch Kleineren und diese wiederum zehren von pflanzlichem Plankton. Dennoch ist die Erforschung gerade dieser Basis des Nahrungsnetzes hoch kompliziert – und es stellen sich immer wieder neue Fragen.

Jeder der gerne Fisch isst, steht biologisch gesehen auf der obersten Ebene des marinen Nahrungsnetzes. „Das kann man so sagen, ja“, lacht Professor Maarten Boersma, Ökologe am AWI auf Helgoland. Zusammen mit seinem Team erforscht er im „Helgoland Food Web Project“, wie die einzelnen Maschen des Nahrungsnetzes in der Nordsee miteinander verwoben sind.

Das Projekt konzentriert sich auf die ganz Kleinen: Fischlarven, winzige Krebse, Mikroalgen und Bakterien. Denn dieses Kleinstplankton ist die Grundlage für alles höhere marine Leben. Das Ziel ist, Wechselwirkungen im System herauszuarbeiten – weit über die Fresskette „wer frisst wen“ hinaus: Das Modell eines Nahrungsnetzes berücksichtigt auch Rückkopplungen zwischen den einzelnen Konsumenten, zudem spielen Nährstoffkreisläufe eine Rolle oder auch die Bakterienaktivität. „Wir hören nicht bei ‚Zooplankton konsumiert Algen‘ auf, sondern wir fragen auch ‚Welche Effekte hat umgekehrt das Zooplankton auf Algen?‘“, erklärt Boersma. Um diese und andere Wissenslücken zu füllen, arbeiten Zoologen, Algenspezialisten, Bakteriexperten, Ökologen und Ozeanografen im Food-Web-Projekt und am AWI fachübergreifend zusammen.

### Stickstoff und Phosphor „schmecken“ anders

Oft tauchen im Zuge ihrer Untersuchungen Fragen zu Dingen auf, von denen die Wissenschaft bereits glaubte, sie beantwortet zu haben. Etwa wenn es um Jungfische geht. Sie leben von tierischem Plankton, das ist lange bekannt. Bekannt ist auch, wie viel die Minifische fressen müssen, um zu überleben. Aber wo genau fressen sie es? „Wenn man ausrechnet, wie viel Plankton das Wasser ihnen im Laufe ihres Lebens in die Mäuler spült, dann passen die Mengen nicht.“ Das Plankton im Wasser ist viel zu verdünnt, als dass die Fische ausreichend Nahrung bekommen würden. Wahrscheinlich ist, dass die Fische örtliche Ansammlungen von Zooplankton „abweiden“. Solche Häufungen kommen zum Beispiel an Strömungskanten vor, zwischen Wassermassen mit leicht unterschiedlichen Bewegungsmustern. Das führt sofort zu neuen Fragen: Wie finden Fischlarven und andere Organismen dorthin, und welche Rolle spielt die Nahrungsqualität dabei? Wie etwa merken Tiere, wenn sie in einer Algenblüte schwimmen, wo alle durcheinander wuseln, welche Alge am besten für sie ist und warum? Sie tun es, so viel steht fest.

Allerdings muss man mit dem Begriff „Qualität“ vorsichtig umgehen. Denn bezogen auf das Nah-

rungsnetz ist „gut“ oder „schlecht“ kein Merkmal der Beute selbst, in diesem Fall der Algen. Qualität wird vielmehr dadurch definiert, wie gut das fressende Tier wächst. Dabei kommt es nicht nur auf den Energiegehalt von Kohlenstoff an. An der Basis des marinen Nahrungsnetzes bestimmen auch Stickstoff und Phosphor, wie wertvoll Algen als Nahrung fürs Zooplankton sind. Während Kohlenstoff vor allem in Küstengewässern praktisch unbegrenzt vorhanden ist, stehen Nährstoffe wie Nitrate oder Phosphate nur begrenzt zur Verfügung, je nach den chemischen Bedingungen im Meer. Doch Geißeltierchen und Ruderfußkrebse, die von den Algen leben, brauchen vergleichsweise mehr von diesen Stoffen. Bekommen sie diese nicht, gedeihen sie weniger gut. „Das ist so, als würden wir nur Süßigkeiten essen. Dann setzen wir zwar an. Trotzdem fehlen uns wichtige Stoffe wie Vitamine oder Mineralien.“

### Fehlmaschen im Nahrungsnetz

Irgendwann passen dann bestimmte Maschen im Nahrungsnetz nicht mehr zusammen: „Schlechte“ Algen ernähren weniger Ruderfußkrebse, sodass davon wiederum weniger Fisch- und Hummerlarven satt werden. „Das hat sichtbare Folgen. Der Dorsch zum Beispiel schwindet in der Nordsee, unter anderem weil ihm die richtige Nahrung fehlt“, erklärt Boersma.

Oder das System gerät zeitlich außer Takt - ausgelöst durch den Klimawandel. Denn die Tiere im Meer sind fast alle wechselwarm. Ihr Stoffwechsel beschleunigt sich, je wärmer das Wasser wird - allerdings bei jeder Art unterschiedlich schnell. Fische, die sich ursprünglich im Sommer gepaart und gelaicht haben, tun das womöglich künftig schon im Januar. Zu dieser Zeit gibt es jedoch noch keine Algenblüte, die die Larven nähren könnte.

Dennoch ist Maarten Boersma optimistisch. Lose Seilenden im Nahrungsnetz würden sich auch wieder zu festen Maschen zusammenfügen.

### Weben oder weben lassen?

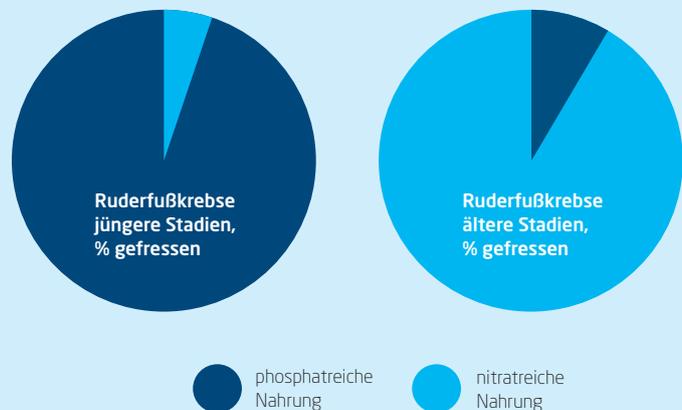
„Wir müssen aber begreifen, dass wir die Basis des Nahrungsnetzes nicht direkt beeinflussen können. Plankton lässt sich schlicht nicht managen.“ Zwar gab es schon vereinzelt Versuche, das Meer mit Phosphor zu düngen, um die Primärproduktion hochzupumpen, damit am Ende mehr Fisch im Netz landet. Aber wollen wir das? Wollen wir aktiv am Nahrungsnetz weben, oder soll die See selbst ihre Balance finden? Oder vielleicht etwas dazwischen? „Das ist ein schmaler Grat und muss politisch und gesellschaftlich immer wieder neu ausgehandelt werden. Wir als Wissenschaftler können dazu nur das Grundwissen liefern.“

Für sich persönlich und seine Rolle auf der obersten Nahrungsnetzebene hat Boersma jedenfalls eines beschlossen: Helgoländer Hummer landet bei ihm nicht auf dem Teller. „Davon gibt es heute einfach nicht mehr genug, als dass wir sie weiter dezimieren sollten.“ Das, immerhin, kann jeder selbst beeinflussen.



Foto: M. Loeder

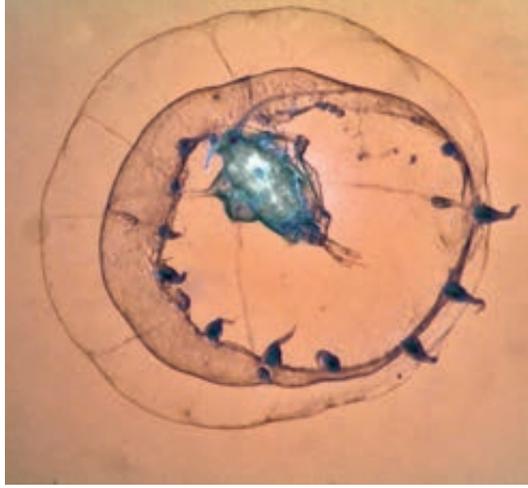
### Unterschiede im Fressverhalten jüngerer und älterer Ruderfußkrebse



### Nahrungsqualität: Viel Gehalt, wenig Substanz

Im Vergleich zu den 1970er Jahren enthält das Meerwasser heute mehr Kohlenstoff, aber weniger Nitrat und Phosphat. Dieses Stoffverhältnis spiegelt sich auch im Algenplankton - viel Gehalt, wenig Substanz. Aber merkt das algenfressende Plankton das überhaupt? Ja! Dinoflagellaten und Ruderfußkrebse zum Beispiel wählen gezielt „gutes“ Futter, haben Fraßversuche gezeigt: An die beiden Modellorganismen wurde eine Halb-und-halb-Mischung aus Algen mit viel oder wenig Stickstoff im Vergleich zu Phosphor oder Kohlenstoff verfüttert. Nach einer festgelegten Fresszeit waren die verbliebenen Anteile der zwei Algensorten im Wasser jeweils unterschiedlich. Dinoflagellaten und die jungen Stadien von Ruderfußkrebsen hatten vorwiegend Algen mit wenig Stickstoff und damit vergleichsweise mehr Phosphor gefressen - vermutlich, weil Phosphor fürs Wachstum wichtig ist. Die älteren Larven der Ruderfußkrebse hatten dagegen stickstoffreiche Algen bevorzugt, da sie dieses Element für den Aufbau von Körperstrukturen brauchen. Wie genau das Zooplankton die Algen unterscheidet, sollen künftige Versuche klären.

Viele Feinde: Der Ruderfußkrebis links wird von einer Hydromeduse verspeist. Im rechten Bild macht sich ein Anthozoe über einen anderen Ruderfußkrebis her, von dem noch das rote Auge und die durchsichtigen Antennen zu erkennen sind.  
Fotos: R. Schüller



## Extrawurst nach Planktonart

Im Nahrungsnetz mariner Winzlinge könnte es wohlgeordnet zugehen - wenn sich nicht manche Planktonarten ab und zu „eine Extrawurst“ gönnen würden. Kaum beginnt die Algenblüte, werden manche Arten zu den reinsten Fress-Opportunisten: Aus Selbstversorgern werden Beutejäger, Vegetarier füttern Fleisch - oder Jäger und ihre eigentliche Beute konkurrieren plötzlich ums gleiche Mahl.



Ein Copepode (Ruderfußkrebis) im Schlaraffenland: Die kleinen Punkte sind Mikroalgen, Nahrung der Krebse.  
Foto: R. Schüller

Tierische Einzeller fressen pflanzliches Plankton und Bakterien. Vielzeller fressen Einzeller. Kleineres Zooplankton landet in den Mägen von größerem Zooplankton und dieses wiederum im Bauch von Fischlarven. So weit so regulär. Doch während einer Algenblüte ist nichts regulär. Ständig ändert sich das Nahrungsangebot: Erst gibt es viele Nährstoffe und wenig Algenplankton im Wasser. Dann gedeihen die Algen, verbrauchen dabei die Nährstoffe und stehen ihrerseits als Futter zur Verfügung. Am Ende ist das Wasser an Nährstoffen verarmt und auch der Algenvorrat schrumpft. „Entsprechend turbulent verläuft auch die Schlacht am marinen Büffet“, sagt Dr. Nicole Aberle-Malzahn.

Zusammen mit ihrem Kollegen Dr. Martin Löder hat sie das Gourmetmenü während einer Frühjahrsalgenblüte untersucht. In 750-Liter-Tanks haben die Forscher quasi eine künstliche Nordsee ins Labor geholt. Mithilfe einer ausgeklügelten Lichtsteuerung haben sie den Tagesgang der Sonne und die zunehmende Tageslänge am Breitengrad von Helgoland simuliert. Einen Monat lang haben die Wissenschaftler jeden Tag Wasserproben genommen und die Artzusammensetzung sowie das Fraßverhalten des Zooplanktons darin untersucht - und eine Überraschung erlebt: „Bestimmte Planktonarten passen ihren Ernährungsstil dem jeweiligen Angebot an. Das war bekannt. Wir haben aber nicht geahnt, welches Ausmaß das annimmt“, sagt Löder.

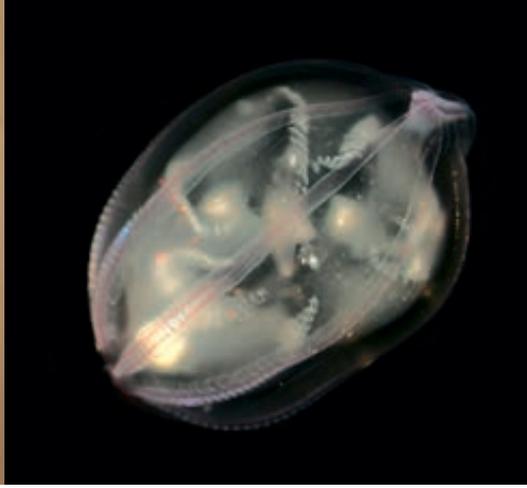
Einige Dinoflagellaten etwa versorgen sich wie Pflanzen per Photosynthese selbst. Während der Hochzeit der Algenblüte aber, wenn die Nährstoffe für pflanzliches Wachstum knapp werden, verhalten sie sich eher wie Tiere und naschen

fremd. Sie bedienen sich an kleineren Algen - eine beachtliche Konkurrenz zum Beispiel für Ruderfußkrebse: Dinoflagellaten können sich durch Zellteilung einfach „verdoppeln“ und so zahlenmäßig viel schneller auf verfügbares Futter reagieren.

Ruderfußkrebse wiederum sind als Vegetarier auch auf Algen fixiert - zunächst. Denn manche Algen bilden Kolonien und sind deswegen irgendwann zu groß, als dass die Kleinkrebse sie fressen könnten. Stattdessen orientieren diese sich um und stellen verstärkt tierischen Einzellern nach. „So bekommen sie Nährstoffe, die bereits über eine Stufe mehr im Nahrungsnetz angereichert sind. Das entspricht dann einem Menschen, der Schnitzel vom Schwein isst, das seinerseits Kartoffeln und Wurzeln gefressen hat“, erläutert Löder.

Und die Sache verkompliziert sich noch: Fischlarven, die an und für sich Ruderfußkrebsen nachstellen, fressen auch mal tierische Einzeller - und schnappen so ihrer eigentlichen Beute die Beute weg. Und das sind nur drei Beispiele von Planktonarten, die beim Gourmetmenü die „Extrawürste braten“.

„Diese ganzen Querbeziehungen beim Fressen haben offenbar eine wichtige Kontrollfunktion im System, mit der man gar nicht in der ausgeprägten Form gerechnet hat“, sagt Aberle-Malzahn. „Bei der Berechnung der Kohlenstoffbilanz im Meer müssen künftig also auch die zusätzlichen Fraßstufen berücksichtigt werden. Dies wurde bislang schlicht unterschätzt - insgesamt eine arbeitsintensive aber spannende Aufgabe.“



Gelee frisst Gelee: Die Rippenqualle *Beroë* sp. hat eine andere Rippenqualle erbeutet, die Seestachelbeere *Pleurobrachia pileus* (mikroskopische Aufnahmen links im Durchlicht fotografiert, rechts im Auflicht). Fotos: U. Nettelmann

## Vorwärts in die Vergangenheit

Quallen gab es schon immer in der Nordsee. Sie fressen sich untereinander und halten sich so gegenseitig gut in Schach. Was aber passiert, wenn eine neue Qualle ankommt? – Wie die „Meerwalnuss“ ins Nahrungsnetz eingreift und wie sie und ihre Verwandten vielleicht die Zukunft der Lebewelt in der Nordsee gestalten.

Glasig und elfengleich – *Mnemiopsis leidyi*, zu Deutsch die Meerwalnuss, sieht harmlos aus. Als die Rippenqualle vor einigen Jahren erstmals in der Nordsee auftauchte, löste das dennoch zunächst Schrecken aus: Im Schwarzen Meer hatte sie in den 1980er-Jahren die Fischbestände katastrophal dezimiert, denn sie frisst Fischlarven und -eier. Wie berechtigt sind also die Ressentiments?

Mit Futterexperimenten hat Dr. Arne Malzahn herausgefunden, was die Meerwalnuss bevorzugt frisst, und welchen Platz sie damit im Nahrungsnetz einnimmt. „Dafür musste ich sie unbedingt lebend beobachten“, sagt Malzahn. Aber wie fängt man ein Tier, das so zart ist und durch die Fangnetze rutscht? „Zum Glück haben Quallentiere die Angewohnheit, an Grenzflächen zwischen Wassermassen mit verschiedenen Eigenschaften zusammenzutreiben. Dort habe ich sie dann aus dem Oberflächenwasser geschöpft.“ Gewebeproben verriet, was die Tiere gefressen hatten, denn Quallentiere bauen die Isotopensignatur ihrer Nahrung in ihre Gelatine ein. Einige Tiere wurden im Labor kontrolliert gefüttert, um das Fressverhalten direkt beobachten zu können.

Ergebnis: In der Tat frisst die Meerwalnuss von Fischlarven und -eiern – doch eher selten. Nur wenige Körperprozent stammen aus Fisch. Vielmehr ist die Meerwalnuss eine Hungerkünstlerin. Selbst wenn sie eigentlich nicht genug anderes Futter bekommt, rührt sie Fisch kaum an. Allerdings verzichtet sie nicht „bewusst“, sondern es gibt natürliche Hemmnisse: An Larven kommt sie kaum heran, weil sie keine Tentakel hat und die Larven ihr deswegen gut entwischen können. Und Fischeier lösen bei ihr schlicht keinen Fangreflex aus. „Die Meerwalnuss wird die Nord-

see also wahrscheinlich nicht an den Rand des Fischbestands bringen“, sagt der Fischereibiologe. „Trotzdem sollte man sie weiter beobachten.“

Einerseits ist sie klar ein neuer Fraßkonkurrent. Zwar dominiert bislang die kurze Nahrungskette, an deren Ende viel Fisch steht: Algenplankton landet im Magen von Ruderfußkrebse und die im Bauch von Fischen. Doch das System tendiert nach und nach in Richtung großes Nahrungsnetz: Mehr winziges tierisches Plankton macht den Ruderfußkrebse Konkurrenz und frisst sich obendrein gegenseitig, bis es statt in Fischmägen hauptsächlich in den Mägen von Quallen endet.

Andererseits kommen die Meerwalnuss und ihre Verwandten offenbar besser als andere mit dem Wandel in den Meeren zurecht. Zum Beispiel gibt es immer mehr Gebiete, in denen das Wasser an Sauerstoff verarmt. „Eine Frage ist also, wie genau Quallen mit Sauerstoffarmut umgehen. Es scheint, als hätten sie kaum Probleme, während Fische ordentlich zu kämpfen haben.“

Beides spricht dafür, dass das marine Leben künftig einen ausgeprägt gelatinösen Charakter haben könnte.

„So neu ist eine solche Szenerie gar nicht“, sagt Malzahn. „In der Erdgeschichte sah das Nahrungsnetz schon mal so aus, bevor die Fische ihren Siegeszug antraten.“ Vor mehr als 400 Millionen Jahren und fern unserer Vorstellung. Dennoch „trägt Überfischung viel stärker dazu bei, dass sich das System dorthin zurückwandelt, als die natürlichen Prozesse. Im Grunde ist es ganz einfach: ein gezielteres Fischereimanagement. Besser ließe sich die Sache kaum steuern.“



# Ausdauer gefragt

Langzeitmessungen belegen  
Wandel im Ökosystem



Das Planktonnetz filtert kubikmeterweise Nordseewasser. So finden die Biologen vom AWI auf Helgoland auch neue Arten wie den japanischen Gespensterkrebs *Caprella mutica*.  
Fotos: S. Zankl, U. Nettelmann



## Nordsee auf neuem Kurs?

Langzeituntersuchungen vor Helgoland bestätigen: Die Nordsee ist wärmer geworden, die Frühjahrsblüte verändert sich und so manche neue Art aus dem Süden macht sich dort breit. Wie der Klimawandel ein ganzes Ökosystem umkrempelt.

Seit 1962 fährt ein Boot der Biologischen Anstalt Helgoland (BAH) jeden Werktag zur gleichen Stelle zwischen Helgoland und Düne, zur „Kabeltonne“, wie die Wissenschaftler sagen. Dort werden Temperatur und Sichttiefe des Wassers gemessen, Planktonnetze ausgeworfen und Wasserproben genommen. Im Labor bestimmen Wissenschaftler später den Salz- und Nährstoffgehalt und untersuchen das Plankton. Nur wenn

ein Orkan über die Nordsee fegt oder Eis auf dem Wasser treibt, bleibt das Boot im Hafen. Aber Eis hat Kapitän Klings hier schon lange nicht mehr gesehen. Denn in der Nordsee hat sich einiges verändert: „Die durchschnittliche Wassertemperatur ist in den vergangenen 50 Jahren um etwa 1,7 Grad Celsius gestiegen“, sagt Professorin Karen Wiltshire.

Als die heutige Leiterin des Instituts vor gut zehn Jahren nach Helgoland kam, ahnte sie noch nicht, welchen Schatz sie hier heben würde. Akribisch hat die Hydrobiologin die Daten aus den jahrzehntelangen Messungen an der „Kabeltonne“ sortiert und ausgewertet sowie die Messungen, die offiziell „Helgoland Reede“ heißen, fortgeführt und erweitert. „Diese Zeitserie ist so einzigartig, dass uns täglich Wissenschaftler aus der ganzen Welt danach fragen. Auf Basis unserer Daten werden beispielsweise Modelle von Ökosystemen entwickelt und Klimamodelle verifiziert. Behörden nutzen sie, um Strategien für das Management der Meere zu entwickeln.“ Was macht die „Helgoland Reede“ so kostbar? Mit den Daten können die Wissenschaftler einer Menge Fragen nachgehen, vor allem wenn es um Langzeittrends geht. Wie ändert sich die Artenzusammensetzung? Wer frisst wann wen? Wie reagieren Ökosysteme auf sich verändernde Umweltbedingungen?

### Algen sind Gewinner

Wie die globale Klimaerwärmung ein ganzes System durcheinanderbringen kann, haben Wiltshire und ihre Kollegen an der Frühjahrsblüte der einzelligen Algen in der Nordsee nachgewiesen. Seit rund 20 Jahren ist das Wasser im Winter hier warm. Das hat zunächst dem Zooplankton, den mikroskopisch kleinen Tieren im Meer, einen Vorteil verschafft. Den ganzen Winter über haben sie alles pflanzliche Plankton abgegrast, sodass die Algenblüte später anfang. Doch das Blatt hat sich gewendet: Inzwischen ist es dem Zooplankton zu warm geworden, die Algen aber haben sich angepasst und die Frühjahrsblüte beginnt jetzt tendenziell früher. „Derzeit“, erläutert Wiltshire, „sind die Algen die Gewinner. Ihr Stoffwechsel ist breiter aufgestellt, so dass sie an Schwankungen besser angepasst sind.“

Planktonuntersuchungen sind eine Sisyphusarbeit. Zwar bedeckt der Inhalt einer Wasserprobe gerade einmal den Boden einer Kaffeetasse, aber in ihr können sich im Sommer durchaus 100 verschiedene Arten tummeln - und diese müssen

unter dem Mikroskop bestimmt und gezählt werden. „Damit sind unsere Technischen Assistenten täglich einige Stunden beschäftigt. Aber kein Gerät kann so exakt arbeiten wie sie - das haben wir mehrfach getestet“, betont Karen Wiltshire.

Und das Leben an Helgolands Küste wird immer bunter. In den vergangenen 50 Jahren haben sich hier mindestens 60 neue Tier- und Pflanzenarten angesiedelt - die Dunkelziffer ist schätzungsweise dreimal so hoch. Zum einen die „Aliens“, die an den Rümpfen und im Ballastwasser der Schiffe oder in Produkten aus Aquakultur von weither „angereist“ sind. So landeten etwa die Pazifische Auster und der Japanische Beerentang in der Nordsee. Zum anderen haben sich aufgrund des Klimawandels viele wärmeliebende Arten aus südlicheren Gefilden aus eigener Kraft an der Atlantikküste hochgearbeitet. Professor Heinz-Dieter Franke kennt die Neankömmlinge gut. Der Biologe hat beispielsweise die Flohkrebse genau unter die Lupe genommen. „Seit langer Zeit sind etwa 50 verschiedene Arten von Flohkrebse hier um Helgoland herum bekannt. In den vergangenen 20 Jahren sind mindestens neun Arten sicher dazugekommen: zwei aus Japan und Neuseeland eingeschleppte Newcomer, sieben Arten sind aus südlicheren Gegenden mit milden Wintern eingewandert“, berichtet Franke.

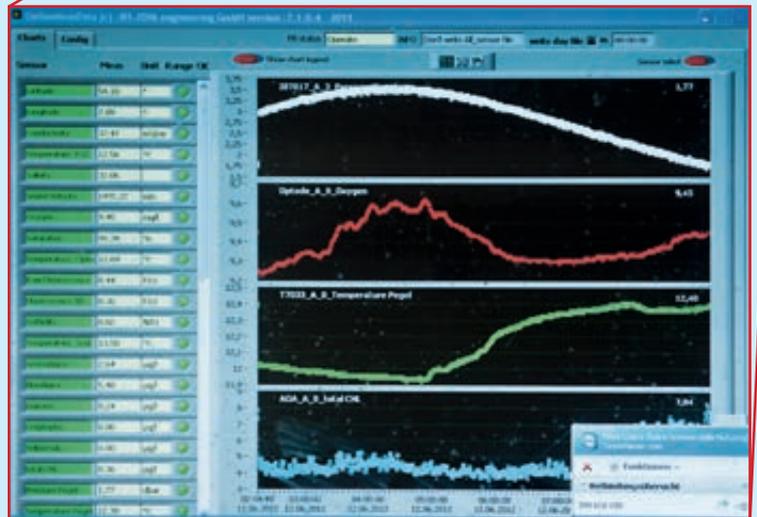
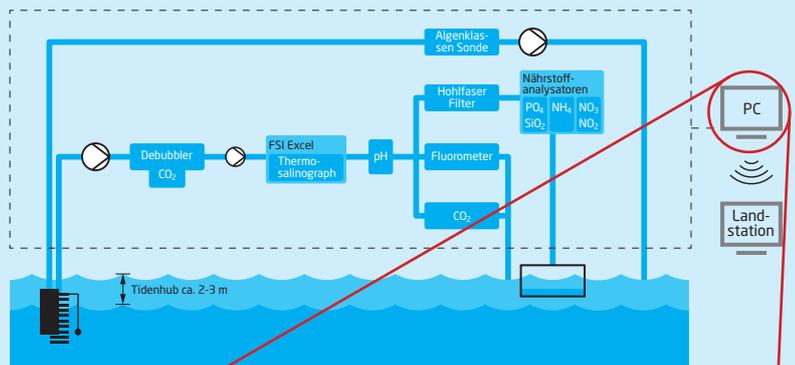
Konkurrenz für die, die schon lange da sind? Bislang hat kein einziger Neankömmling eine einheimische Art verdrängt. Vielmehr leben sie in friedlicher Koexistenz miteinander. Franke erläutert, warum. „Die Deutsche Bucht ist ein sehr junges, noch ungesättigtes Ökosystem. Viele Nischen sind noch frei, in denen sich neue Arten ansiedeln können - im Gegensatz zu alten, artenreichen Ökosystemen, wie den tropischen Regenwäldern, wo der Konkurrenzdruck viel höher ist.“ In Sachen Artendiversität ist die Nordsee also ein Gewinner des Klimawandels. Ein Grund zum Aufatmen ist das jedoch nicht. Denn jede Art reagiert anders auf die Erwärmung der Meere. Entwicklungsphasen einzelner Arten können sich zeitlich verschieben, sodass Räuber-Beute-Beziehungen aus dem Gleichgewicht geraten - auch in der Nordsee (siehe „Vom Fressen und Gefressen werden“, Seite 18).

Belastbare Vorhersagen für die Nordsee sind ein Ziel der Küstenforschung. Dafür wollen die Helgoländer Wissenschaftler stärker mit Klimaforschern zusammenarbeiten. „Ihre Modelle können für die Ökologie sehr nützlich sein“, sagt Karen Wiltshire.

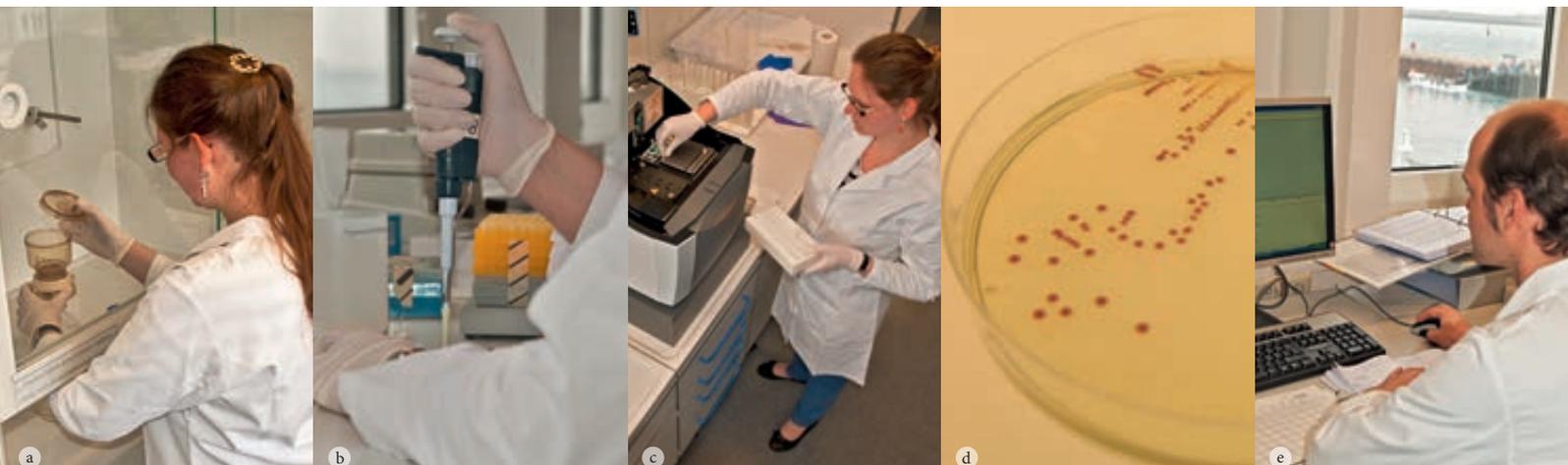
### Im Dauerdienst

Ursprünglich für den Einsatz auf Fähren entwickelt, ergänzt die FerryBox - die „Fähren-Kiste“ - die Datenreihe „Helgoland Reede“ mit wertvollen weiteren Daten. Pumpen leiten dabei kontinuierlich Seewasser in ein automatisches Messsystem. Im Dauerbetrieb erfassen dessen Sensoren und Analysegeräte wichtige biologische und chemische Messgrößen: Temperatur, Salzgehalt, Trübung, Sauerstoff- und Kohlendioxidgehalt, pH-Wert, Fluoreszenz, Chlorophyll und Nährsalze, wie Silikat, Phosphat, Ammonium, Nitrit und Nitrat. Ein Computer steuert die Anlage, zeichnet die Daten auf und überträgt sie an die BAH, wo Wissenschaftler sie auswerten. Die fortlaufenden Messungen zeigen Langzeittrends, aber auch Tag-Nacht-Rhythmen einzelner Messgrößen.

Fließschema der FerryBox



Vollgestopft mit Messsensoren liefert die FerryBox rund um die Uhr aktuelle Werte über eine Datenleitung direkt an den Arbeitsplatz. Foto: U. Nettelmann



## Vibrionen mögen's warm

In besonders heißen Sommern haben Vibrionen-Infektionen an deutschen Stränden schon für Aufregung gesorgt. Gefahr erkannt, Gefahr gebannt? Ein Gespräch mit den Mikrobiologen Dr. Gunnar Gerdts und Dr. Antje Wichels von der Biologischen Anstalt Helgoland über Durchfallerkrankungen, Wundentzündungen, Schnelldiagnostik und Risikogebiete.

Vibrionen aus der Nord- und Ostsee werden mit unterschiedlichen Methoden bestimmt und beschrieben. Dazu gehören klassische mikrobiologische Züchtung (a, d) genauso wie Untersuchungen zu genetischen Markern (b, c) oder MALDI-TOF einem chemischen Verfahren zur Bestimmung bestimmter Zellbestandteilen von Vibrionen mit Hilfe der Massenspektrometrie (e). Fotos: U. Nettelmann, R. Erler

### Was sind Vibrionen?

**Gerdts:** Das sind Bakterien, die vorwiegend in warmem und nährstoffhaltigem Küstenwasser leben. Derzeit kennen wir etwa 70 bis 80 Arten. Drei davon sind als für den Menschen gefährlich eingestuft: der Choleraerreger *Vibrio cholerae*, ein weiterer Durchfallerreger und eine *Vibrio*-Art, die zu Wundinfektionen führt. Es gibt darüber hinaus etliche Arten, die für Fische und andere Meerestiere gefährlich sind. Aber wir wissen nicht, wie viele Arten tatsächlich zumindest ein infektiöses Potenzial haben – auch für den Menschen.

### Eigentlich sind die gefährlichen Vibrionen in Südostasien und Ländern mit viel Aquakultur zu Hause. Warum können sie an deutschen Küsten zu einer Gefahr werden?

**Wichels:** Im Ballastwasser der Schiffe, in Fischen und Muscheln gelangen sie in unsere kaltgemäßigten Gewässer. Die Klimaerwärmung und die Überdüngung der Meere verbessern die Lebensbedingungen für diese Bakterien in Ost- und Nordsee, sodass sie sich hier stärker etablieren könnten.

### Gibt es dafür Hinweise?

**Wichels:** Durch kontinuierliche Messungen vor Helgoland haben wir nachgewiesen, dass Vibrionen sich ab Wassertemperaturen zwischen 10 und 14 °C stark vermehren. Aber noch etwas anderes kann passieren: Bislang ungefährliche Stämme könnten sich durch Erbgutveränderungen in Krankheitserreger verwandeln. Wie der Choleraerreger, bei dem Bakteriophagen – das sind Viren, die sich in das Erbgut speziell von Bakterien einschleusen – die Produktion des Choleraerotoxins anstoßen.

**Gerdts:** Vor Cholera müssen wir uns hier wahrscheinlich kaum fürchten. Aber ältere Menschen oder Menschen mit einem geschwächten Immunsystem können sich beim Baden schon bei kleinen Verletzungen schwere Wundentzündungen einfangen, die tödlich enden können – wenn sie nicht zügig behandelt werden.

### Das erfordert eine schnelle Diagnostik.

**Gerdts:** Genau, dafür wollen wir eine sichere Methode entwickeln, um für den Fall einer Epidemie gewappnet zu sein. In dem großen Verbundprojekt „VibrioNet“ mit Bundesinstituten und Landesämtern bauen wir eine Vibrionen-Datenbank auf. Mit Massenspektrometrie, einem modernen Analyseverfahren aus der klinischen Mikrobiologie, untersuchen wir derzeit die Vibrionen in etwa 1.000 Proben und charakterisieren die verschiedenen Stämme. Außerdem suchen wir nach genetischen Faktoren, die das krankheitserregende Potenzial bestimmen.

**Wichels:** Gekoppelt mit Umweltdaten, wie Temperatur, Salz- und Nährstoffgehalt sowie Meeresströmungen, ließen sich künftig auch Risikogebiete identifizieren.

### Noch sind Vibrionen-Infektionen hierzulande recht selten. Was haben die stark betroffenen Länder von Ihrer Forschung?

**Gerdts:** Gerade Schwellenländer, wie Indien, Bangladesch oder Chile, können sich diesbezüglich nur wenig Forschung leisten. In dem Verbundprojekt arbeiten wir eng mit ihnen zusammen und unterstützen sie mit unseren Technologien und Methoden. Unser Projektpartner ist Chile.

## Detektivarbeit im Mikrokosmos

Biodiversität im Kleinen: Pflanzliche und tierische Winzlinge leben nicht einfach nebeneinander her. Sie interagieren miteinander und gegeneinander - und das in Größenordnungen, die sich unseren Augen entziehen. Um sie zu identifizieren und die Zusammenhänge zu verstehen, reicht kein einmaliger Blick ins Meer. Man muss sie fortlaufend studieren.

Eine Reihe Probengläschen, ein Mikroskop und dicht an dicht Fachliteratur. So sieht sie aus, die Zentrale der ständigen Bestandsaufnahme im Meer. Von ihrem Helgoländer Büro an der BAH koordiniert Dr. Alexandra Kraberg die Langzeitbeobachtungen des Alfred-Wegener-Instituts. „Vom Artenbestand über Atmosphärenwerte bis zu Stoffumsätzen ist alles dabei - es gibt fast nichts, das am AWI nicht regelmäßig gemessen wird.“

Sie selbst arbeitet an mikroskopisch kleinen Algen - technisch eine immer wieder eine Herausforderung. Um die Arten genau bestimmen zu können, müssen die Winzlinge unter das Mikroskop. Das kann schon mal Tüftelarbeit sein: Mit einer feinen Nadel, an die eine Wimper geklebt ist, kann man das Untersuchungsobjekt unter dem Mikroskop hin und herbewegen, um es von allen Seiten zu sehen. Selbst mit dieser zeitaufwendigen Methode, sieht man aber oft - nichts. „Häufig fehlen die typischen Merkmale, die eine Art charakterisieren. Etwa winzige Anhängsel, die abgefallen sind. Oder ein Anhängsel ist zwar markant, aber ungeeignet, eine Art von der anderen zu unterscheiden“, beschreibt Kraberg die Tücken solcher Untersuchungen. „Das ist reinste Detektivarbeit!“ Im Rahmen routinemäßiger Zählungen großer Probenmengen lässt sich das allerdings zeitlich nicht realisieren. Schon gar nicht weil es sich bei solchen Proben um chemisch fixierte Proben handelt, in denen die Zellen oft nur begrenzt Ähnlichkeit mit ihrem lebenden Pendant haben. Lässt sich trotz aller Bemühungen etwas nicht bestimmen, werden die Zellen daher nur in Größenklassen gruppiert und gezählt - ein Problem, dass es in vielen Zeitreihen gibt.

Alle Ergebnisse fließen ins PLANKTON\*NET (<http://planktonnet.awi.de>). In dieser Datenbank sind sämtliche am AWI registrierten Plankton-typen mit Bild gespeichert, von Spitzbergen bis Galapagos. Dabei ist es oft nicht das perfekte, sondern das durchschnittliche Bild, das bei der Artbestimmung weiterbringt. Zusammen mit zwei Kollegen hat Kraberg deshalb auch ein Bestimmungsbuch zusammengestellt. Es zeigt „gerade nicht die ästhetischen Superfotos sondern Plankton, wie man es ungeschönt beim Mikroskopieralltag sieht: die Alge, angefärbt oder mit verschiedenen Stoffen fixiert. Wer vor einer Probe mit zig Arten sitzt, hat davon mehr.“



Und auch Expertenaugen blicken nicht immer sofort durch: 2009 tauchte in den Langzeitaufzeichnungen „Helgoland Reede“ eine ‚neue‘ Kieselalge auf, *Mediopyxis helysia*. Kraberg ist fasziniert. „Mit rund 100 Mikrometern Durchmesser, das ist so dick wie ein menschliches Haar, ist *Mediopyxis* eine relativ große Kieselalge.“ Wenn sie schon früher vor Helgoland aufgetreten ist, hätte man sie eigentlich sehen müssen. „Allerdings ähnelt sie einer anderen, hier in der Nordsee auftretenden Art. Es ist außerdem möglich, dass sie früher bereits beobachtet, aber nur als Größenklasse notiert wurde, weil sie erst seit 2006 als eigenständige Art beschrieben ist. Deshalb können wir nicht absolut sicher sein, dass sie nicht schon früher da war. Jetzt haben wir *Mediopyxis* aber immer im Blick.“ Dafür mussten und müssen die Forscher in der Tat am gleichen Ort, im Rahmen von Langzeitbeobachtungen, immer wieder hinsehen.



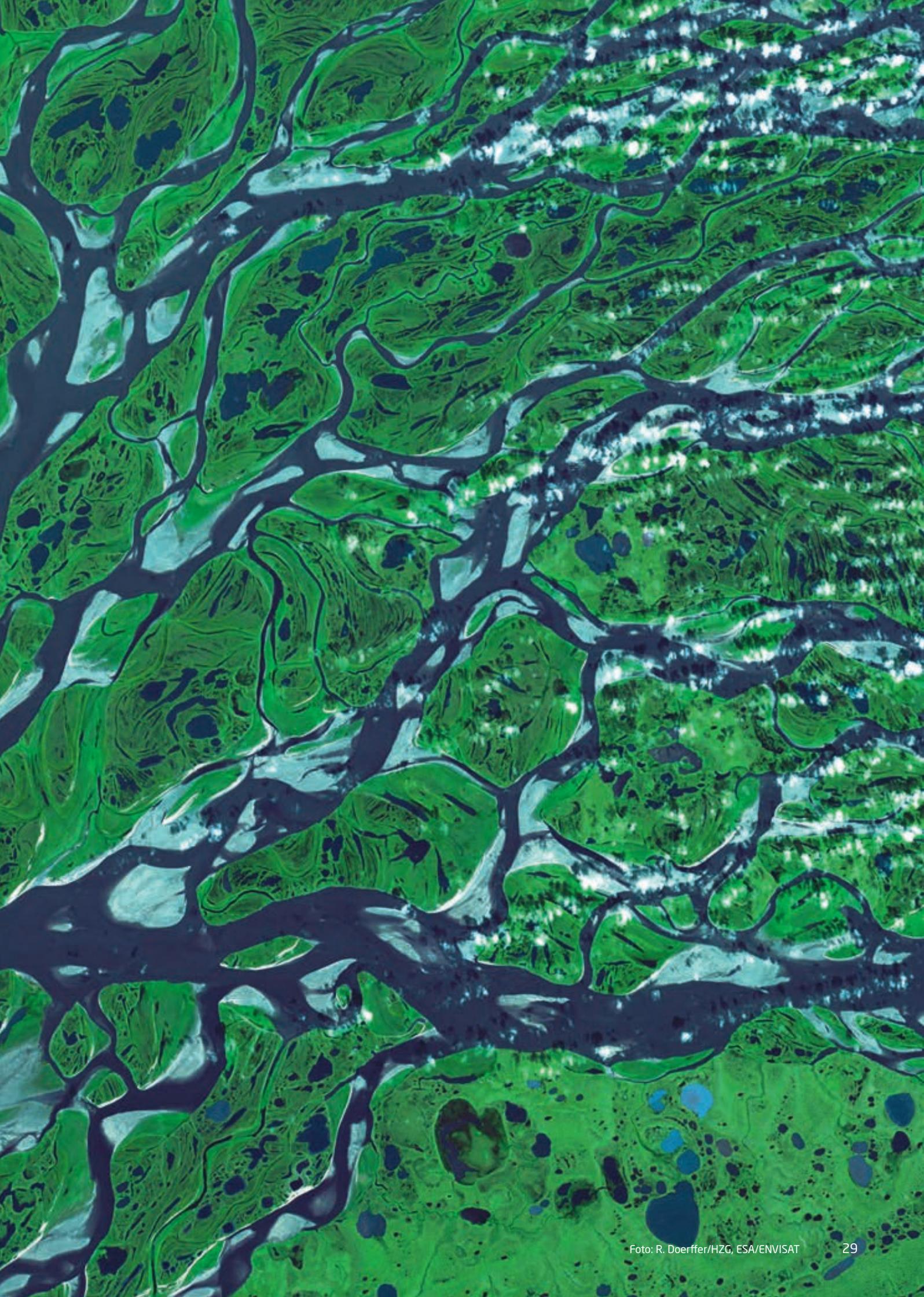
Wer den Wandel im Ökosystem analysieren möchte, benötigt einen langen Atem. Was nicht direkt im Feld bestimmt werden kann, wandert im Labor unter ein Binokular oder ein Mikroskop. Bestimmungsbücher helfen, Arten zu identifizieren, denn hier sind die typischen Identifikationsmerkmale festgehalten. Fotos: S. Zankl (oben), PLANKTON\*NET (mitte), R. Schüller (unten)



The background of the page is an aerial photograph of a river delta. The water is a vibrant green, and the channels are dark, creating a complex, organic pattern. The text is overlaid on the lower-left portion of this image.

# Hotspots des Klimawandels

Die Polarregionen





## Schmelzende Gletscher und trübes Wasser

Wie eine Wetterscheide ragt die Antarktische Halbinsel in den Zirkumpolarstrom hinein. Das macht sie zu einer besonders klimasensiblen Region. Das ewige Eis ist kein ewiges Eis mehr, der Sedimentregen aus den Schmelzwasserströmen vertreibt manche Meeresbewohner von der Küste und stark kälteangepassten Tieren droht der Hitzeschock. Seit fast zwei Jahrzehnten verfolgen AWI-Forscher die Spuren der globalen Erwärmung im Nordwesten des Südkontinents.



Forschung vor der Haustür: die Forscher der Carlini-Station können ihre Untersuchungsgebiete zu Fuß erreichen. Fotos: H. Poigner, D. Abele, E. Philipp

62° 14' S, 58° 40' E, King George Island, Antarktische Halbinsel. Wenn das Boot in die kleine Bucht einbiegt, die Potter Cove, baut sich ein riesiger Gletscher vor den Augen auf. Ungefähr 70 Meter hoch bildet er den westlichen Rand der 400 Meter dicken Eiskappe der Insel. Das Eis schiebt sich weit in die Bucht hinein. Bis auf ein kleines Fleckchen ist King George Island weiß. So jedenfalls haben AWI-Wissenschaftler vor rund 20 Jahren ihre Ankunft an der Forschungsstation erlebt. Heute sehen sie ein anderes Bild: Auf der Insel thront ein großer Vulkan, der Meter um Meter mehr Luft schnuppern kann. Die ganze Küste ist nahezu eisfrei. Und es ist grün: Flechten breiten sich aus, Algen wachsen die Felswände hoch, überall sprießt antarktisches Gras. „Man könnte denken, man ist in Schottland“, sagt Privatdozentin Doris Abele. Die Biologin vom Alfred-Wegener-Institut in Bremerhaven erforscht seit 1995 das südliche Ende der Welt. Gemeinsam mit dem Argentinischen Antarktisinstitut, Instituto Antártico Argentino, betreibt das AWI dort das Dallmann-Labor als Teil der Carlini-Station.

Was ist in der Potter Cove passiert? Die Klimaveränderung hat dort deutliche Zeichen gesetzt. Der Gletscher schmilzt und zieht sich immer weiter aufs Land zurück. Allein von 2000 bis 2008 ist der Eispanzer etwa 30 Meter dünner geworden. Zudem taut der Permafrostboden der Insel langsam auf. „An vielen Stellen plätschern die Gletscherbäche. Im antarktischen Sommer stürzen teilweise richtige Wasserfälle in die Bucht. Manchmal ist das Wasser rot – ein Indiz dafür, dass viel Eisen, Mangan und Aluminium aus dem tauenden Boden herausgewaschen wird“, erläutert Abele.

Die Westantarktische Halbinsel ist die Region mit der stärksten Erwärmung in der ganzen Antarktis.

In den vergangenen 50 Jahren kletterte dort die mittlere Lufttemperatur um mehr als drei Grad Celsius nach oben. Das Wasser ist in den vergangenen 25 Jahren um ein Grad Celsius wärmer geworden. „Das ist für manche Meeresorganismen sehr viel“, sagt die Tierphysiologin. „Ihre Toleranz gegenüber Temperaturanstieg ist sehr gering. Denn in Millionen von Jahren haben sich viele wechselwarme Tiere in der stabilen Kälte fest eingerichtet: Sie haben den Stoffwechsel heruntergefahren und leben sehr gemächlich. Manche Fische und Schnecken beispielsweise haben im Laufe der Evolution ihre Hitzeresistenz-Gene erst einmal ‚kaltgestellt‘, denn eigentlich brauchen sie diese nicht.“ Doris Abele hat zusammen mit Kollegen in Feld- und Laborexperimenten bei eng verwandten Meeresschnecken nachgewiesen, dass Arten von Patagonien und Feuerland mit funktionstüchtigen Hitzeresistenz-Genen einen Temperaturanstieg besser wegstecken als ihre antarktischen Verwandten.

Doch nicht nur das wärmer werdende Wasser stresst viele Meeresorganismen. Das Sediment, das die Schmelzwasserströme mitbringen, „regnet“ auf die Bewohner am Meeresboden herab. Viele Organismen können damit schlecht umgehen. Die Folge: „Wie unsere argentinischen Kollegen durch jahrelange Tauchuntersuchungen zeigen konnten, wachsen dort jetzt mehr abgeflachte Seescheiden und viele Seefedern, die mit der Sedimentbedeckung besser leben können, als die flaschenartigen, hochstehenden Seescheiden“, sagt Abeles Kollegin Dr. Valeria Bers. Der Antarktische Krill ist fast gänzlich aus dem Küstenwasser verschwunden. Da das Krebstier in Sachen Energieverbrauch auf großem Fuß lebt, braucht es viel Nahrung. Wenn der Magen aber mehr mit Sediment als mit Plankton gefüllt ist, dann verhungert Krill.



Der Sedimentregen trübt außerdem das Ozeanwasser. Für Algen bedeutet das: weniger Licht, weniger Photosynthese, weniger Biomasse - und das heißt weniger Nahrung für Schnecken, kleine Krebse und andere Algenfresser in den küstennahen Lebensräumen. Pinguine wiederum müssen sich dadurch weiter von ihren Brutplätzen entfernen, um genug Nahrung für sich und ihre Küken zu finden.

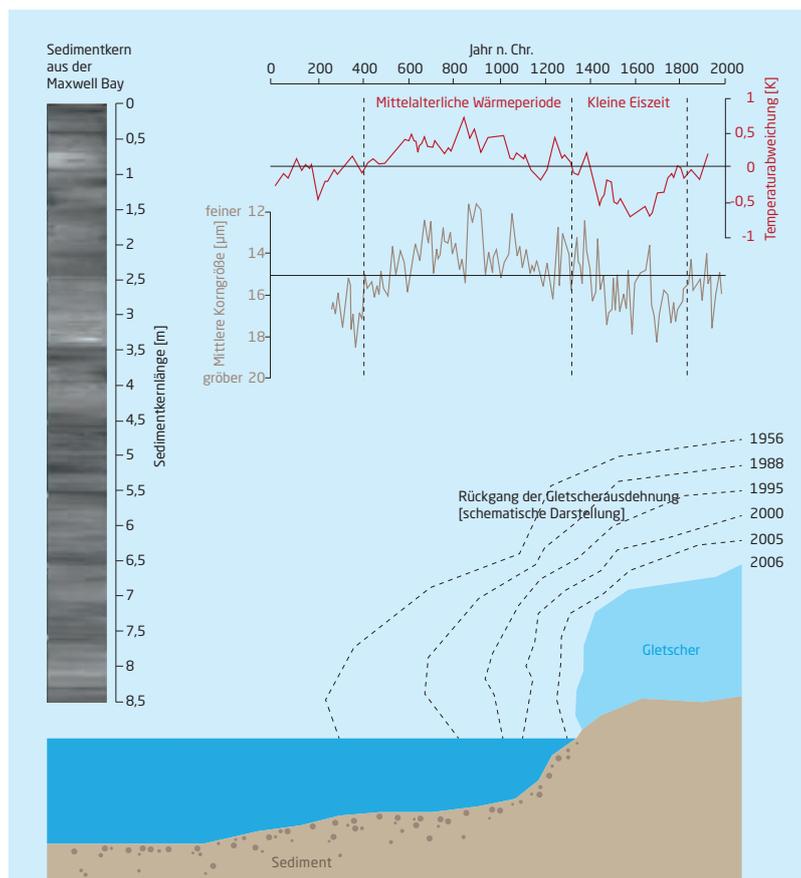
All diese Prozesse sind lediglich kleine Teile eines ganz großen Puzzles, das sich nur interdisziplinär und international lösen lässt. Im Verbundprojekt IMCOAST arbeiten AWI-Wissenschaftler seit 2010 noch enger mit europäischen und argentinischen Kollegen zusammen. Biologen, Gletscherforscher, Biogeochemiker, Ozeanografen und Mikrobiologen gehen der Gletscherschmelze und ihren Auswirkungen im Detail auf den Grund.

Ein weiteres internationales Projekt steht in den Startlöchern: das Netzwerk-Projekt IMCONet. Ab 2013 werden die Wissenschaftler zeitweise an den weltweiten Partnerinstituten arbeiten und mit den dortigen Kollegen Proben analysieren, Daten auswerten und Modelle weiterentwickeln. Wie das Modell, das Bers gerade mit Kollegen aus Buenos Aires entwickelt hat. Es dient der Analyse von Langzeitdatensätzen zu den Veränderungen im Wasser, wie zum Beispiel bei Temperatur und Salzgehalt. „Wir haben aber noch so viele Daten“, sagt die Meeresbiologin, „dass wir mindestens drei Jahre weiter daran arbeiten müssen. Zum Beispiel um die Analysen in die südlicheren Bereiche der Halbinsel auszudehnen. Dort haben die Wissenschaftler der britischen Rothera-Station und der US-amerikanischen Palmer-Station ebenso fleißig Daten gesammelt.“

„Wir werfen, salopp gesagt, erstmals unsere Langzeitergebnisse in einen Topf, damit wir ein Gesamtbild der Westantarktis bekommen. Diese verstärkte Kooperation der Forschungsstationen ist ein riesiger Fortschritt“, sagt Bers. Die Carlini-Station liegt ganz im Norden der Halbinsel. Aufgrund der Nähe zum südamerikanischen Kontinent herrschen dort besondere Verhältnisse, und es ist zu

erwarten, dass sich die Veränderungen im Norden deutlich von denen im Süden unterscheiden. Mit der Analyse der gesammelten Daten wollen die Forscher die klimabedingten Veränderungen entlang der Nord-Süd-Achse der Antarktischen Halbinsel nachvollziehen und die Auswirkungen auf die polaren Ökosysteme abschätzen.

Forscherinnen und Forscher am Dallmann-Labor haben einen großartigen Blick auf die majestätische antarktische Gletscherlandschaft. Foto: G. Aguirre



#### Klimageschichte aus Gletscherschutt

Die schmelzenden Gletscher in der westlichen Antarktis spülen verstärkt feines Sediment ins Meer. Das Eis hat es vom Felsgestein darunter abgeschürft und zermahlen. Hierfür bilden die Potter Cove und die daran anschließende Maxwell Bay einzigartige Untersuchungsgebiete: Korngrößenanalysen und die Vermessung des Meeresbodens mithilfe von Wasserschall verraten, wie viel Sediment ins Meer gelangt und wo genau es sich abgelagert. Zugleich bieten Sedimentkerne ein hochaufgelöstes Klimaarchiv. Während der vergangenen 2000 Jahre wurden in der Maxwell Bay mehrere Meter mächtige Sedimente abgelagert, ein halber Zentimeter pro Jahr – ungewöhnlich viel. Hieraus und anhand der heutigen Muster des Gletschereintrags können die Wissenschaftler nun vergangene Klimawechsel im eisigen Süden rekonstruieren.



Fotos: oben: K. Piel, links: J. Boike

## Tauender Permafrost erwacht zum Leben

Einst gab es auf Herschel Island im Nordwesten Kanadas fünf Eiskeller. Dort im Permafrost deponierten die Walfänger ihre Beute. Heute steht nur noch einer dieser „Kühlschränke“, in dem auch AWI-Forscher Lebensmittel und ihre Proben lagern. Die anderen sind eingestürzt. Fragen nach dem Warum an den Geowissenschaftler Dr. Hugues Lantuit von der Forschungsstelle Potsdam des Alfred-Wegener-Instituts.



### **Etwa ein Viertel der Landmasse der nördlichen Hemisphäre ist dauerhaft gefroren. Welche Bedeutung haben Permafrostböden?**

**Lantuit:** Zum einen sind sie Lebensraum, besonders die arktischen Küsten und Flussdeltas. Die Menschen in Sibirien, Kanada und Alaska bauen darauf Wohnhäuser, Schulen, Dörfer, ganze Städte, Eisenbahnstrecken und Flughäfen. Zum anderen ist der Permafrost eine riesige Kohlenstoffspeicher. In den oberen drei Metern steckt in den abgestorbenen Pflanzen aus tausenden von Jahren etwa doppelt so viel Kohlenstoff wie in der gesamten Atmosphäre enthalten ist.



### **Was passiert derzeit im Permafrost?**

**Lantuit:** Mit der globalen Erwärmung taut der Boden in einigen Regionen tendenziell im Sommer immer tiefer auf und friert im Herbst und Winter erst später oder nicht komplett wieder durch. Aber wir beobachten sehr viel Variabilität von Jahr zu Jahr. Mit längeren Zeitreihen, wie wir sie im Rahmen einer internationalen Messkampagne begonnen haben, können wir die Entwicklung künftig besser beurteilen.



Expedition nach Sibirien: beeindruckende Landschaft, Kombination aus Zeltlager und moderner Messtechnik sowie selber anpacken, egal ob Techniker oder Professor. Fotos: K. Wischniewski, N. Bornemann, M. Gräber

### **Wovon hängt es ab, wie tief der Boden auftaut?**

**Lantuit:** Der wichtigste Faktor ist die Lufttemperatur. Gelangt viel Wärmeenergie in den Boden, taut er tiefer auf. Dazu kommen die Grundbedingungen: Aus welchem Sediment besteht der Boden, wie viel Wasser oder Eis steckt darin,

wachsen dort Bäume oder bedeckt Tundra den Boden? Sedimentreicher Permafrost taut schneller als eisreicher. Bodennahe Vegetation wirkt isolierend. Ebenso Schnee, der den Boden noch stärker vor Kälte schützt. Je wärmer Permafrost ist, desto schneller kann er auftauen.

### **Mit welchen Folgen?**

**Lantuit:** Der Boden verliert an Stabilität, sodass Gebäude ins Wanken geraten und Straßen absacken. Dazu kommt der Klimateffekt. Tauender Permafrost erwacht quasi zum Leben: Bakterien verwandeln den gespeicherten Kohlenstoff in Kohlendioxid und Methan und entlassen diese Treibhausgase in die Atmosphäre. Diese erwärmt sich weiter, was dazu führt, dass der Boden immer tiefer auftaut und noch mehr Treibhausgase emittiert – es entsteht eine positive Rückkopplung, der Prozess verstärkt sich also selbst.

### **Durch den Klimawandel könnten aus der Tundra aber auch Taiga-Moore oder Wälder werden. So würde mehr Vegetation entstehen. Ein Ausgleich für die Bodenemissionen?**

**Lantuit:** Solche Effekte sind denkbar. Mehr Vegetation kann mehr Kohlenstoff speichern – denselben Kohlenstoff, der gerade aus dem tauenden Boden in die Atmosphäre entlassen worden ist. Aber der Kohlenstoffkreislauf ist sehr komplex und geht sogar im Meeresboden weiter: im „submarinen Permafrost“ unter den arktischen Schelfmeeren.



Fotos: oben: K. Piel, rechts: H. Lantuit

## Arktische Küsten auf dem Rückzug

In der Arktis kommt einiges zusammen: Das Meereis schwindet, der Permafrost taut, die Stürme werden heftiger und das Ozeanwasser wird wärmer. Für die Küsten bedeutet das erhöhte Erosionsgefahr, für die Menschen Sorge um ihre Heimat - und für die Polarforscher viel Arbeit. Sie schauen über und unter Wasser, was genau gerade an den arktischen Küsten passiert.

Jeden Sommer, manchmal auch im Frühjahr, bekommen die Inuvialuit Besuch. AWI-Forscher reisen dann in die kanadische Arktis, um das Land dieser einheimischen Volksgruppe zu studieren. Im Mackenzie-Delta und auf Herschel Island im äußersten Nordwesten Kanadas schlagen die Wissenschaftler für einige Wochen ihre Zelte auf - auch im April bei minus 20 Grad Celsius. Was ist so interessant in diesem unwirtlichen Teil der Erde?

„Die Küsten in der Arktis verlieren Boden. Vielerorts weichen sie ein bis zwei Meter im Jahr zurück, in manchen Regionen sogar bis 30 Meter“, sagt Dr. Hugues Lantuit von der Forschungsstelle Potsdam des Alfred-Wegener-Instituts. Eigentlich ist diese Küstenerosion ein normaler Prozess: Wind, Wellen, Regen und Schnee nagen am Meeresufer. Sediment wird ins Meer gespült, über kurz oder lang kommt es zu Rutschungen oder Abbrüchen. „Nur sind die Küsten in der Arktis weniger robust als anderswo. Sie bestehen nicht aus Festgestein, sondern aus Sand, Ton, Schluff und Eis - eine verhältnismäßig stabile Konstruktion, so lange der Boden gefroren ist“, erläutert Lantuit. Taut der Permafrostboden jedoch auf, wird das Eis zu Wasser und der Boden gerät ins Rutschen. Und das nicht nur über Wasser. „Wenn eine Küste erodiert, dann auch unter Wasser“, sagt Lantuit.

Der Geograf wird mit seinen Kollegen per Schlauchboot die Küstenlinie abfahren. Sie wollen die Wassertiefe kartieren und das Unterwasserprofil der Küste untersuchen. „Wie die Wellen auf eine Küste treffen und was sie dort anrichten,

hängt davon ab, wie steil eine Küste ist, aus welchem Material sie besteht und wie groß die Kraft der Wellen ist.“

Die könnte nämlich steigen, wenn mit dem Klimawandel mehr heftige Stürme auf die Küsten treffen. Außerdem schwindet der Schutzschild, das Meereis. Viele arktische Küsten sind im Sommer komplett eisfrei und damit den Wellen schutzlos ausgeliefert. Mittlerweile bildet sich das erste Eis frühestens Mitte Oktober wieder, wenn die Herbststürme bereits toben. Ob und wie das alles die Küstenerosion beschleunigt, wollen Lantuit und seine Kollegen herausfinden.

Mithilfe von Sedimentkernen aus dem Meeresboden verfolgen die Wissenschaftler auch die Spur des Kohlenstoffs. Wie viel Küste wurde in den vergangenen Jahrtausenden abgetragen? Bleibt das abgetragene Kohlenstoffsediment am Meeresgrund liegen oder wird es wegtransportiert? Wie viel Permafrost steckt im Meeresboden? Auch Klimadaten lassen sich aus den Sedimentkernen gewinnen. Nicht zuletzt verändern die Sedimenteinträge auch die Lebensbedingungen für die Meeresfauna. „Mit welchen Folgen, das wissen wir noch nicht“, sagt Hugues Lantuit.

Diese interessieren die Inuvialuit ebenso, denn im Sommer fischen sie hier. Wissenschaftler und Bevölkerung arbeiten ohnehin eng zusammen: „Mit den Erfahrungen der Inuvialuit können wir unsere Erkenntnisse besser einordnen. Unsere wissenschaftlichen Ergebnisse wiederum bilden eine Grundlage für das Küstenmanagement vor Ort.“



Rund um den Arktischen Ozean erodieren die Permafrostküsten, in manchen Regionen verschwinden bis zu 30 Meter Küste pro Jahr. Fotos: H. Lantuit



# Aus der Luft, an Land und unter Wasser

Methoden moderner  
Meeresforschung





Foto: S. Domisch

## Waldspaziergang unter Wasser

Riesige Brauntange und andere marine Großalgen bieten vielen Fischen und Wirbellosen einen Lebensraum. Doch der Klimawandel setzt den Algen zu - manchen Arten mehr, anderen weniger. Mit Freilandbeobachtung, Laborversuchen und Fernerkundung erforschen Wissenschaftler diese scheinbar einfachen Organismen.



Bizarre Formen können die Fruchtkörper von Braunalgen annehmen.  
Foto: C. Buschbaum

Etwa zwei Meter misst das schlanke, gelbbraune Algenblatt, das Dr. Inka Bartsch an ihre Bürotür in Bremerhaven gepinnt hat. Früher spülte das Meer massenweise Zuckertang aus dem nahen Felswatt an die Strände von Helgoland. Doch die Zeiten sind vorbei. „Die Bestände dieser Braunalge verändern sich gerade europaweit drastisch“, berichtet die Biologin. „Vor Helgoland ist der Zuckertang in größere Tiefen abgetaucht, in Südnorwegen findet man nach zwei warmen Sommern deutlich weniger davon.“

rungen ihres Lebensraums.“ So sind viele Brauntange dem Tode geweiht, wenn die Wassertemperatur längere Zeit über 20 Grad Celsius liegt. Welche Tiefen Großalgen besiedeln, hängt davon ab, wie klar das Wasser ist - also wie viel Licht am Meeresboden ankommt. Da das Küstenwasser bei Helgoland verhältnismäßig trüb ist, wachsen Großalgen dort nur bis in Tiefen von 10 bis 13 Meter. Zum Vergleich: Im klaren polaren Wasser vor Spitzbergen hat Bartschs Kollege Professor Christian Wiencke noch in 60 Metern Tiefe Rotalgen gefunden.



Braunalgen der Gattung *Fucus* wachsen auf dem Helgoländer Fessockel.  
Foto: U.Schilling

Große Brauntange, die sogenannten Laminarien, bilden mit ihren langen ledrigen Blättern ganze Unterwasserwälder. Wissenschaftler sprechen von „Kelpwäldern“. Sie sind Wohnzimmer, Schutzraum, Kinderstube und Futterkammer für Krebse, Würmer, andere Wirbellose und viele Fische. Zudem setzen sich kleinere Algen auf den großen Pflanzen fest. Brauntange und andere Großalgen wachsen weltweit an allen lichtdurchfluteten Felsküsten, am liebsten in den kalt-gemäßigten und polaren Regionen.

Doch das Wasser an Helgolands Küsten verändert sich, denn es wird zunehmend vom Atlantik beeinflusst. So wird das Wasser klarer und manche Algen können weiter in die Tiefe vordringen. Ihr Lebensraum ist also größer geworden. Die Nordsee ist aber auch wärmer geworden (siehe „Nordsee auf neuem Kurs?“, Seite 24). Wirkt sich das auf die Artenvielfalt der Großalgen aus? Bartsch hat die ganze historische Literatur durchgeflöht, bis ins Jahr 1845 zurück. Daraus kann die Botanikerin zumindest Trends ableiten: „Heute finden wir weniger Braunalgen, aber mehr Grünalgen.“ Warum manche Art verschwunden ist, weiß niemand genau. „Temperaturänderungen spielen immer eine Rolle, aber auch andere Faktoren, wie Krankheiten.“

### Sein und Nichtsein durch Temperatur und Licht

Mit dem Klima ändern sich jedoch mancherorts die Lebensbedingungen. Inka Bartsch erforscht seit 27 Jahren die Großen unter den Algen und ist immer noch fasziniert: „Diese scheinbar primitiven Organismen sind sehr komplex. Deshalb reagieren sie teilweise empfindlich auf Verände-

Seit sieben Jahren ist Inka Bartsch den Großalgen bei Helgoland noch dichter auf den Fersen.

## Automatische Kartierung von oben

Um die Verbreitung der Algen an Helgolands Küsten genauer zu untersuchen, setzen AWL-Forscher in Kooperation mit der Universität Kiel und der FIELAX AG Bremerhaven auf Fernerkundung aus der Luft. Ein Flugzeug mit einem sogenannten hyperspektralen Sensor überfliegt die Küstenbereiche und erfasst die Reflexion der Algen im Felswatt. Hinter jedem Pixel steht dabei das gesamte Farbspektrum des sichtbaren Lichts bis in den nahen Infrarotbereich. Mit Hilfe der charakteristischen Reflexion der einzelnen Algengattungen lässt sich ihre Verbreitung grob kartieren. Da 99 Prozent der Makroalgen allerdings nie aus dem Wasser auftauchen, soll der Sensor künftig auch erkunden, was unter Wasser wächst. In diesem Zusammenhang entwickeln die Forscher derzeit auch eine Anwendung für den hyperspektralen Satelliten EnMAP, der Bilder aus dem Orbit liefern soll.

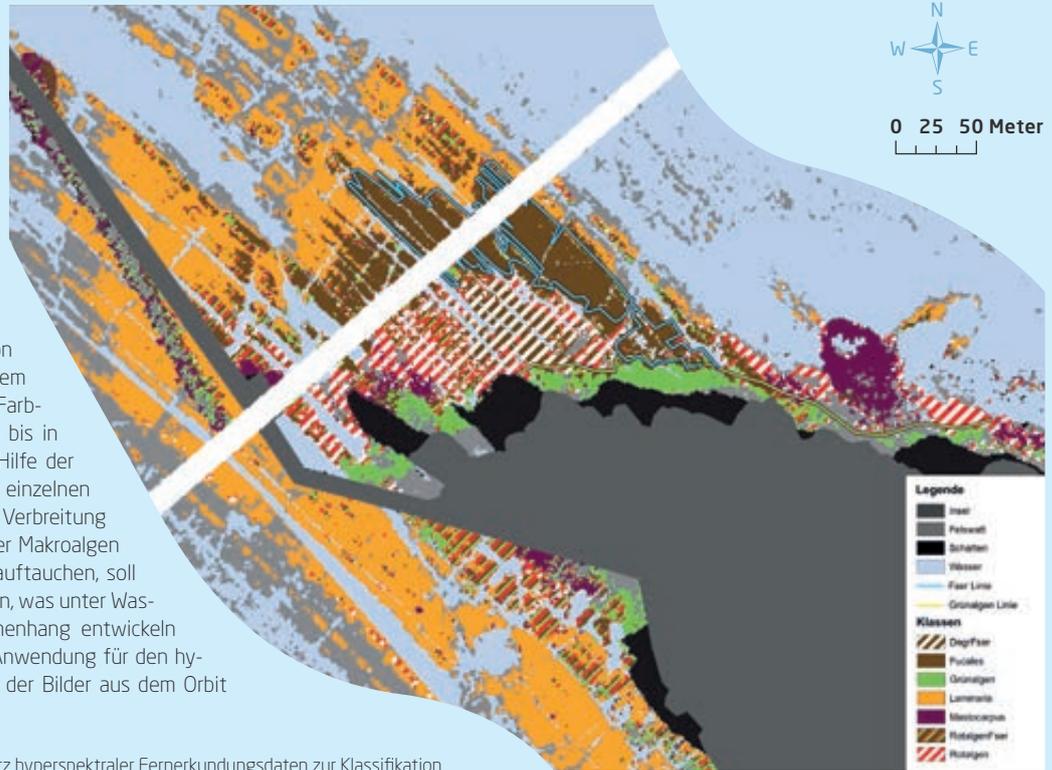


Bild: Inga Eisenhardt 2011. Der Einsatz hyperspektraler Fernerkundungsdaten zur Klassifikation von Makrophyten im Felswatt von Helgoland. Diplomarbeit, Universität Kiel

In Kooperation mit dem Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein erfassen ihre Mitarbeiter jeden Sommer und Winter auf einer kleinen Fläche der Gezeitenzone ganz genau, welche Algen dort wachsen - und wie viele von jeder Art. „Selbst in dieser kurzen Zeit verzeichnen wir deutliche Schwankungen“, sagt Bartsch. Nachdem vermutlich der Orkan „Kyrill“ im Januar 2007 die ganze Decke von Fucus-Braunalgen „wegrasiert“ hatte, dauerte es drei Jahre, bis die Algendecke wieder hergestellt war. „Wenn sich im Zuge des Klimawandels starke Stürme möglicherweise häufiger über der Nordsee austoben, dann bleibt manchen Arten vielleicht nicht genug Zeit, sich zu erholen.“ Die Wissenschaftler haben außerdem zwei Neuankommlinge unter den Rotalgen gefunden - Arten, die aus südlicheren Gebieten eingewandert sind und in der wärmer werdenden Nordsee auch gut zurechtkommen.

Wie der Japanische Beerentang, *Sargassum muticum*. Ihn hat es etwa 1980 als Treibgut in die Nordsee verschlagen. Inzwischen ist er dort sesshaft geworden und bildet richtige Unterwasserwälder - am liebsten in wellengeschützten Ecken, wo er möglichst nie im Trockenen liegt. Diese Habitate teilt sich der Japanische Beerentang oft friedlich mit der einheimischen „Meereiche“ *Halidrys siliquosa*, auch Schotentang genannt. An manchen Stellen aber drängt der Neuankommling die heimische Art etwas zurück.

## Wie viel ist zu viel?

Wo genau für einzelne Großalgen die Schmerzgrenze hinsichtlich Umweltveränderungen liegt, lotet Inka Bartsch auch im Labor aus. Wie viel Ozeanversauerung verträgt eine Art? Wie gut verkräftet sie steigende Wassertemperaturen? Wie stark beeinflussen Licht und Tageslänge das Wachstum? Häufig zeigt erst die Interaktion von zwei Faktoren, wie eine Art reagiert. Die Biologin erläutert das am Beispiel einer Rotalge aus dem Nordatlantik: „In wärmerem Wasser wächst die Alge zwar schlechter, aber mit gleichzeitig erhöhter Zufuhr an Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) - wie bei der Ozeanversauerung - lässt sich das ausgleichen.“

Wie sensibel die Kelpwälder an den polaren Küsten sind, untersucht die Biologin nun im Kongsfjord von Spitzbergen. Denn der Golfstrom treibt warmes Atlantikwasser immer weiter in den Norden. Zudem gelangen von den schmelzenden Gletschern Süßwasser und Sedimente in den Ozean. Gemeinsam mit Christian Wiencke und weiteren Kollegen wird Inka Bartsch eine Bestandsaufnahme machen und diese mit ähnlichen Daten von 1998 vergleichen. Darüber hinaus will sie die Fortpflanzung der polaren Großalgen genau studieren. Denn so manches Geheimnis ist noch nicht gelüftet.



Der Japanische Beerentang *Sargassum muticum* hat sich in der Nordsee angesiedelt. Foto: M. Molis



Braunalgen der Gattung *Laminaria* bilden unter Wasser ausgedehnte Tangwälder. Foto: H. Krumbek



Foto: B. Hüssel

## Die Mathematik des Watt-Speiseplans

Welches tierische Plankton frisst welches pflanzliche Plankton unter welchen Bedingungen? Das lässt sich gut im Labor untersuchen und über dieses Nahrungsnetz im Kleinen haben die Helgoländer AWI-Experten schon viel Wissen zusammengetragen. Doch was ist mit dem Nahrungsnetz im Großen? Dem kommen die Sylter AWI-Forscher mit Wattwanderungen und Mathematik auf die Spur.

Gummistiefel, Friesennerz, Kescher - ausgerüstet für Matsch und Wetter marschieren die Forscher der Sylter Wattenmeerstation jeden Tag raus ins Watt. Sie überwachen die Populationen von Krebsen, Muscheln oder Schnecken und welches Tier welchem nachstellt. Außerdem fahren sie einmal im Monat mit dem Katamaran „Mya“ raus und untersuchen in der Sylt-Rømø-Bucht an sieben Stellen den Fischbestand. Alles zusammen liefert „viele Hinweise, dass sich die Speisepläne im Watt deutlichen ändern“, sagt Dr. Harald Asmus. Der Geograf wird mit seinen Kollegen per Schlauchboot die Küstenlinie abfahren. Sie wollen die Wassertiefe kartieren und das Unterwasserprofil der Küste untersuchen. „Wie die Wellen auf eine Küste treffen und was sie dort anrichten, hängt davon ab, wie steil eine Küste ist, aus welchem Material sie besteht und wie groß die Kraft der Wellen ist.“

Um mehr drüber herauszufinden, untersuchen Asmus und seine Kollegen den Energiefluss im System. „Das ist wie bei den Finanzen. Die unterschiedlichen ‚Währungen‘ hier sind allerdings Kohlenstoff, Stickstoff oder Phosphor und die Frage ist immer: Wie viel ‚Währung‘ fließt von einem zum anderen?“ - Von der Primärproduktion zur Stufe der Krebse, Muscheln oder Schnecken über die Vögel bis zu Seehunden und letztlich auch zum Menschen.

Das Gesamtbild liefert die sogenannte Network-Analyse, ein Nahrungsnetzmodell: In einer mathematischen Matrix werden die Nährstoff-Abgeber den Nährstoff-Aufnehmern gegenüber gestellt, verbunden durch die Fraßmengen und Stoffflüsse. „So lassen sich biologische Abläufe in Zahlen fassen, die charakterisieren, wo das Nahrungsnetz Sylter Watt gerade steht. Ändern sich

nun bestimmte Werte, liefert die Matrix anhand dessen ein neues Szenario.“

Außerdem lassen sich an der Matrix Indizes ablesen, die das System Nahrungsnetz Watt theoretisch beschreiben. Etwa, aus wie vielen Einzelkreisläufen es besteht. Ein Beispiel: Phytoplankton wächst, Muschel frisst Phytoplankton, Austernfischer frisst Muschel, Austernfischers Stoffwechsel produziert Nährstoffe, Nährstoffe landen im Meer und davon zehrt wiederum das Phytoplankton. „Für das Sylter Watt liefert die Matrix 1100 verschiedene solcher Kreisläufe. Die meisten davon haben wir draußen auch schon verifiziert.“

Nun wollen Asmus und sein Team gezielt invasive Arten eingliedern. „Wir messen derzeit die entsprechenden Ausgangsdaten und rechnen sie hoch, um sie in die Matrix einzupassen.“ Auch Seehunde sollen zukünftig einbezogen werden. „Allein in der Sylt-Rømø Bucht haben wir 365 Seehunde, die sicher Einfluss haben. Wir wissen auch, was sie fressen und wie viel, aber nicht, wo, denn sie wandern sehr stark.“ Gerade hat ein neuer Doktorand angefangen, der genau diese Wanderungen erfassen soll.

Und Asmus hat noch eine Forschungsidee. „In Amerika wird die Network-Analyse auch auf menschliche Systeme angewandt, auf Dörfer etwa. Mit schwebt vor, so etwas auch hier zu machen. Wie wir uns zur See verhalten, gehört schließlich zum System dazu.“ Eine Teamstudie zwischen Biologie und Soziologie - noch ist es nur ein Gedanke und kein konkretes Vorhaben. Doch solches fachübergreifende Wissen wird für ein nachhaltiges Küstenzonenmanagement in Zukunft wohl immer wertvoller werden.



## Das tauch(g)t was

Viele Meeresuntersuchungen lassen sich im Labor oder mit technischen Sensoren vom Schiff aus durchführen. Manches aber geht nur vor Ort unter Wasser. Fälle für die Feinmotoriker der Meereswissenschaft: die Forschungstaucher.

Wer wirklich dicht dran sein möchte, muss als Meeresforscher eintauchen in die Welt seiner Forschungsobjekte. Deshalb gibt es auf Helgoland das Zentrum für wissenschaftliches Tauchen am AWI, das von dem Fischereiökologen Professor Philipp Fischer geleitet wird. „Als Taucher hat man direkt vor Augen, wie ein Unterwasser-Ökosystem – etwa die Algenwälder um Helgoland – vermutlich funktioniert. Natürlich habe ich auch viel im Labor experimentiert. Aber das bleibt immer nur Simulation“, berichtet Fischer.

Labor- und Unterwasserarbeit miteinander zu verknüpfen ist eine der großen Stärken des AWI. Denn was an Land völlig normal ist – Vogelkundler ziehen durch den Wald, Gräserexperten über die Wiese –, ist unter Wasser nur eingeschränkt möglich. Zwar gibt es tiefen- und salzwasser-taugliches Unterwassergerät. „Aber Taucher sind effizienter ... und billiger!“ Fischer lacht. „Scherz beiseite. Wenn möglich, setzen wir Technik ein. Aber die hat auch Grenzen.“

Da war zum Beispiel die Frage, wie schnell bestimmte Muschelarten in einem Chilenischen Kaltwasserfjord wachsen. Diese Tiere sitzen am Untergrund fest. Um sie im Labor zu untersuchen, müsste man sie aus dem Wasser holen – doch dann wären sie entweder tot oder würden kein natürliches Wachstum mehr zeigen. Die Untersuchung ging also nur unter Wasser. Dafür haben Taucher die Muscheln markiert, mit einem Plastiksack überdeckt und eine Farblösung hineingespritzt. Die Tiere bauen den Farbstoff über den Stoffwechsel in einen Kalziumring in der Schale ein. So kann der Zuwachs später pro Zeiteinheit genau bestimmt werden. Und das Ganze bei Organismen, die nur wenige Zentimeter groß sind? Ohne Taucher keine Chance.

So ist die Aufgabe von Fischers Team generell zweigeteilt. „Einerseits sind wir Dienstleister und führen für nicht-tauchende Kollegen deren Experimente aus, andererseits forschen wir selbst.“ Aktuell untersucht Fischers Arbeitsgruppe, wie die Fischwelt auf „harte“ Uferbaumaßnahmen wie Tetrapoden reagiert, Wellenbrecher aus Beton. „Bisher gibt es gerade einmal zwei wissenschaftliche Studien über den Helgoländer Fischbestand. Wir haben also de facto keine Ahnung, wie es den Tieren geht, ob mit oder ohne Tetrapoden.“ Diese Wissenslücke füllt sich jetzt. Doch auch Tauchstudien liefern nur Momentaufnahmen. „Am besten wäre eine Dauerbeobachtung.“ Diese bietet das Projekt COSYNA, das „Coastal Observing System for Northern and Arctic Seas“. Hierzu gehören mehrere feste glasfaserverkabelte Unterwasserstationen in der Nordsee und in den Polargebieten. Sie versorgen Sensoren und Kameras mit Strom und liefern Daten und Bilder in Echtzeit via Internet zur Analyse direkt ins Labor. Forscher weltweit können dann darauf zugreifen und auch eigene Instrumente an den Verteilern andocken. Gerade wurde vor Helgoland der erste Knoten installiert – das erste deutsche Unterwasserobservatorium überhaupt.

Nimmt es dem Tauchteam womöglich nun alle Arbeit ab? „Sicher nicht. Aus den permanenten Informationen über Temperatur, Druck oder Salzgehalt lassen sich zwar gut große Entwicklungsmuster ableiten. Wir aber bleiben die Feinmotoriker. Geht es um Details, kommt die Forschung nicht am Tauchen vorbei.“



Das Schlauchboot ist häufig die Basis für Tauchgänge. Über eine Sicherungsleine kann der Taucher mit den Kollegen über Wasser kommunizieren. Hat er beispielsweise eine Unterwasser-Installation abgeschlossen, signalisiert er dies per Leinenzug und die Kollegen wissen, dass er gleich wieder auftaucht. Fotos: J. Haschek (li.), P. Fischer (re. o.), J. Haschek (re. m.), P. Fischer (re. u.)



# Raus aus dem Elfenbeinturm

Forschung für Studierende,  
Schüler, Politik und Gesellschaft





## Forschung zu Gast

Die besondere Lage der AWI-Standorte direkt am jeweiligen Untersuchungsgebiet ist nicht nur für die hauseigenen Forscher verlockend: Auch viele Wissenschaftler von anderen Institutionen nutzen und schätzen das Angebot für die Gastforschung.

Dem Gastforscher Otto Larink wird es auf Helgoand nie langweilig: Im Jahr 2012 war er zum 50. Mal auf der Insel. Sein Forschungsinteresse: Anpassungen von Kleinstlebewesen an das Ökosystem. Fotos: U. Nettelmann

Das Blatt fühlt sich glatt und etwas gummiartig an. Und es ist äußerst stabil. Man kann zu zweit ordentlich daran zerren, es reißt trotzdem nicht. Nur die Finger sind leicht klebrig. „Das sind die Zucker, die die Alge bildet“, sagt Professor Kai Bischof von der Universität Bremen und lässt den Brauntang zurück ins Wasserbecken rutschen. Seit zwei Tagen schwimmt die gut einen Meter lange Alge dort herum - frisch aus dem Meer vor Helgoland angekommen. „Wir untersuchen, wie Großalgen auf die Veränderungen im Meer reagieren“, erläutert Bischof. „Dafür ist Helgoland besonders interessant. Denn es gibt keinen anderen Ort in Deutschland, wo man so ausladende Bestände mit so vielen verschiedenen Arten findet.“

Vor allem kommen zur heimischen Vielfalt immer wieder neue Arten hinzu - aus deren eigentlichen Heimat in die Nordsee verfrachtet. Besonders spannend ist der Vergleich: Wie reagieren die angestammten Nordseebewohner und die Zugezogenen auf einen bestimmten Umweltstress? Wie gehen sie mit mehr oder weniger Sonnenstrahlung um, wie mit wärmerem oder kälterem Wasser? Warum ist vielleicht die neue Art stärker und verdrängt die heimische Art? „Anhand solcher Fragen leiten wir ab, wie die Artengemeinschaft in der Nordsee morgen aussehen kann.“

Hierzu fahren Bischof und seine Doktoranden regelmäßig auf die Hochseeinsel und untersuchen die Unterwasserpflanzen vor Ort, wenn sie während Ebbe trockenfallen. Oder sie bestellen beim AWI-Tauchteam Proben. „Wir geben quasi einen ‚Einkaufszettel‘ ab: Wir brauchen 60 Exemplare von dieser oder jener Alge. Die holen uns die Taucher dann mit hoch.“

### Nächste Studie, gleicher Ort

Bischof hat auch schon in den Polargebieten und in den Tropen gearbeitet. „Die Tropen sind wirklich verlockend, nicht nur wissenschaftlich“. Aber ein gut ausgestattetes Labor zu finden, wo man so feine Analysen machen kann, wie seine Studien es brauchen, „ist dort häufig schwierig“.

So zieht es Bischof seit seiner Diplom- und Doktorarbeit am AWI regelmäßig nach Helgoland zurück - mindestens zweimal im Jahr für jeweils zwei Wochen mit Studentenkursen. Der Vorteil: Das AWI stellt die Labore frei zur Verfügung, ohne Nutzungsgebühren. „Das ist ein hoher Wert, gerade für die Nachwuchsausbildung.“

Dem pflichtet auch Otto Larink ausdrücklich bei. Der mittlerweile pensionierte Zoologe aus Braunschweig ist ebenfalls ein treuer Gast. Seit 1963 kommt er jedes Jahr auf die Insel, zunächst als Student und dann ab 1969 bis 2004 als Kursleiter, um dem wissenschaftlichen Nachwuchs Fauna und Flora der Meeresküste nahe zu bringen. „Die Nordsee vor Helgoland bietet eine sehr gute Übersicht über die zoologische Systematik.“

Bis heute hat ihn diese Vielfalt nicht losgelassen. Wie Bischof betont auch Larink die Bedeutung der AWI-Infrastruktur. „Der Kurssaal bietet alle Geräte, die notwendig sind. Und es gibt auch für uns Gäste die Möglichkeit, Pflanzen und Tiere im Labor zu halten. Das ist ein enormer Vorteil. Denn allein am Probenmaterial von draußen sieht man zwar einen Ist-Stand, aber nicht, wie sich die Umwelt über die Zeit genau dorthin entwickelt hat. Außerdem bietet das AWI Schlafmöglichkeiten - kurz: alles, was man braucht, um Kurse gelingen zu lassen.“

Ganz offenbar sind diese gelungen und die Studenten begeistert. Einen zumindest hat es sogar fest am AWI gehalten: Der Helgoländer Meeresforscher Professor Heinz-Dieter Franke war seinerzeit in Larinks Kurs.

### Ambition über und unter Wasser

Larink selbst hatte ursprünglich übrigens weniger Forschungsambitionen unter als über Wasser. Seine Doktorarbeit schrieb er über den Felsenspringer, ein sehr urtümliches Insekt ohne Flügel. Wie der Name sagt, leben sie in Felsen. Helgoland war also prädestiniert für Studien an diesem Tier. „Ich habe einige Exemplare gesammelt, im Labor Eier legen lassen und darüber geforscht, wie sich die Embryonen entwickeln. Und bis die Larven schlüpften, hatte ich Zeit ...“

Larink nutzte sie für einen Blick ins Meer - und entdeckte seine Leidenschaft für marines Plankton. Bei allen seinen Besuchen hat er es immer wieder mikroskopiert und Fotos gemacht, obwohl das vor Jahrzehnten noch recht teuer war. „Wenn ich als Student zehn Tage auf der Insel war, konnte ich mir dafür gerade mal drei Diafilme leisten.“ Heute umfasst Larinks persönliche Datenbank gute 3.000 analoge und mehr als 10.000 digitale Fotos.

Einige hundert davon helfen nun auch anderen Forschern dabei, Arten richtig zu bestimmen und einzuordnen: Aus Larinks unermüdlicher Mikroskopierarbeit ist in Zusammenarbeit mit Wilfried Westheide, früher selbst Forscher auf Helgoland, ein Bestimmungsbuch für marines Plankton entstanden. Auch in der PLANKTON\*NET-Datenbank (<http://planktonnet.awi.de>) findet man seine Bilder. Obwohl Otto Larink viele Arten und Formen darin inzwischen gut kennt, ist er noch immer fasziniert. „Selbst wenn Sie schon 50 Jahre lang das Netz rauswerfen - Sie entdecken immer etwas Neues!“ Auch Bischof entdeckt „Helgoland immer wieder neu“. Nicht nur, weil Helgoland vor der Haustür liegt. „Klar, die Reisezeit ist kurz und das Ticket günstig. Aber das ist es nicht. Mich zieht das Bewusstsein hierher, dass wir vor unserer heimischen Küste wirklich etwas wissenschaftlich Relevantes haben. Was das betrifft, ist die Insel ein äußerst spannender Ort.“

Und wenn es dort mit dem Forschen mal schwierig wird? Etwa wenn die Labore gesperrt sind, weil umgebaut wird? Kein Grund zu kapitulieren. Larink verlagert seine Arbeit kurzerhand ins Gästehaus. „Was brauche ich denn? Eine Petrischale und ein Mikroskop! Und die habe ich immer im Koffer dabei.“ Bischof dagegen holt sich weitere klebrig-glitschige Blätter in noch mehr Wasserbecken in sein heimisches Untersuchungsreich. Und mit seiner Studentengruppe weicht er ausnahmsweise aus - ans AWI nach Sylt.



Schüler der Helgoländer James Krüß Schule forschen im Rahmen von Projekten mit dem AWI auf Helgoland im Freiland und im Labor.

Fotos: K. Herrig, G. Engel, B. Köhn, U. Nettelmann

### OPEN SEA: Schüler erforschen die Nordsee

Wie verändert der Klimawandel die Nahrungsnetze? Gefährden eingeschleppte Arten das Ökosystem? Oder wie gelangen Plastikabfälle in die Meeresorganismen? Diesen Fragen können künftig junge Gastforscher nachgehen. Gemeinsam mit dem Verein „Helgoländer Kinder sind unsere Zukunft e. V.“ und der Jugendherberge Helgoland baut die BAH das Forschungslabor OPEN SEA zunächst für Schüler der gymnasialen Oberstufe auf und erweitert damit ihr Bildungsangebot auf der Insel. In den drei- bis fünftägigen Kursen bekommen die Schüler Basiswissen über Felswatt, Phytoplankton und Co. vermittelt und forschen in eigenen kleinen Projekten - wissenschaftlich und didaktisch begleitet. Und in manchem jungen Gastforscher steckt sicher eine Menge naturwissenschaftliches Potenzial.

Wie der „Ritter der Nordsee“ um ein „Burgfräulein“ wirbt, beschrieb einmal ein Zeitungsartikel. Gewöhnungsbedürftig für Forscher, deren Alltag nüchterne, faktenbasierte Sprache prägt.  
Fotos: I. Schmalenbach



## Und bitte! Meeresforschung fürs Fernsehen

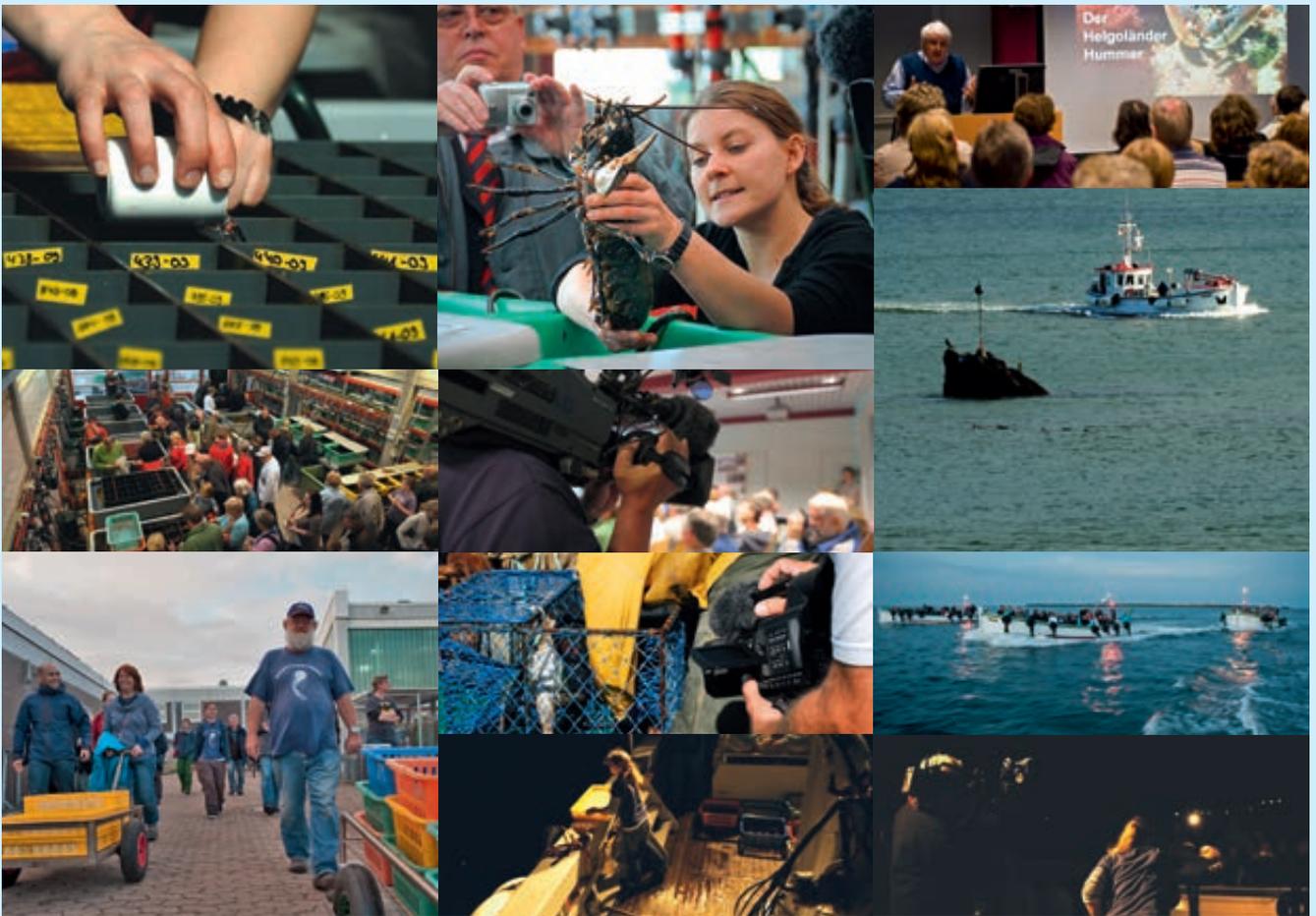
Neben der Wissenschaft hat das AWI ein weiteres Ziel: seine Forschung und deren Ergebnisse der Öffentlichkeit zu vermitteln. Die Webseite bietet aktuelle Informationen. Zudem lädt das AWI die Medien ein, damit Fernsehzuschauer, Hörer und Leser Spannendes über Meeres- und Polarforschung miterleben können.

Es ist abends spät, das Wasser schon schwarz. Im Schein der flackernden Lichter der Insel entleert die BAH-Umweltwissenschaftlerin Isabel Schmalenbach vor der Helgoländer „Langen Anna“ hunderte kleine Becher über die Reling der „Aade“ ins Meer – hunderte kleine Hummer, aufgezogen im Labor. Die Menschen in den Börtebooten applaudieren. Eben wurden ihre Paten-Hummerkinder in die Freiheit entlassen – nach Sonnenuntergang, damit die kleinen Krebstiere Zeit haben, sich vor tagaktiven Fressfeinden in Sicherheit zu bringen.

Ein Kamerateam hält die jährliche Szene fest. Die Regie möchte „Stimmungsbilder“ und Kapitän Dieter Klings steuert das BAH-Schiff „Aade“ ins rote Dämmerlicht. „Medien interessieren sich immer für das Spektakuläre, das ganz große Kino“, sagt Klings.

Er ist es gewohnt, dass ihm Journalisten über die Schulter schauen. Rund 20 Filmer nimmt der Forschungskapitän jedes Jahr mit an Bord und noch mehr Radio- und Zeitungsleute. Sie wollen für Zuschauer, Hörer und Leser einfangen, was das AWI auf der Hochseeinsel forscht. Und die täglichen Ausfahrten von Klings und seinen zwei Kollegen zur Helgoland Reede sind das Herzstück der Langzeitreihen des Instituts.

Darüber auch die Öffentlichkeit zu informieren, nimmt das AWI sehr ernst – um zum Beispiel zu zeigen, was mit Forschungsgeldern geschieht. Die Journalistenanfragen laufen in der Pressestelle in Bremerhaven auf und die koordiniert die Termine. Dann ist das „Aade“-Team an der Reihe.



Fotos: AWI, U. Nettelmann

### Hummerkinder suchen Paten

Der Helgoländer Hummer ist rar geworden. Seit dem Zweiten Weltkrieg ist der Bestand des edlen Krebses stark zurückgegangen – vielleicht wegen der Bombardierung, vermehrte Umweltgifte, zu großer Fangmengen oder weil alles das Zusammenspiel hat. Zudem können sich die wegen der Nordseerwärmung vermehrten warmen Winter negativ auf die Vermehrung der Tiere auswirken. Trotz Schonmaßnahmen ist die Population heute so klein, dass sie sich aus eigener Kraft nicht erholt. BAH-Wissenschaftler wollen den Bestand retten und stabilisieren: Im Labor wollen sie Hunderttausende Jungtiere aufziehen und auswildern, wenn diese etwa vier Zentimeter groß sind. Das Großprojekt braucht jedoch Unterstützung von außen. Seit 2007 können Interessierte Patenschaften für Hummerkinder übernehmen. Die mittlerweile über Tausend Paten erfahren Wissenswertes über die bedrohte Art. Sie können „ihr“ Krebsbaby sogar besuchen und beim Aussetzen in die Unterwasserwelt des Helgoländer Felssockels begleiten.

Inzwischen sind die drei Seeleute schon halbe Profidarsteller. „Das Planktonnetz noch mal einholen bitte. Wir haben die Probennahme nicht gut im Bild.“ Bis Wissenschaft spannend in Szene gesetzt ist, kann es schon mal zig Wiederholungen erfordern. „Es dauert eben, bis es richtig ordentlich über die Planken schwappt.“

Klings nimmt es gelassen. Er unterstützt die Teams rundum: Er erzählt über seine Arbeit, rät zur richtigen Tageszeit fürs richtige Licht oder steuert an die passende Seeposition, wenn die Filmer bestimmte Organismen fürs Bild suchen. „Für jemanden vom Festland ist Meeresforschung unglaublich aufregend. Damit das am Ende auch wirklich so rüberkommt, setze ich mich gerne ein. Das, finde ich, gehört zum Job dazu.“

Nur einmal hat der Kapitän nicht mitgespielt. „Eine Moderatorin trug eine Uniformjacke und eine Kapitänsmütze für die Aufzeichnung. Ich sollte dann auch so ein Ding aufsetzen.“ Das war zu viel. „Ein Film soll doch die Realität zeigen. Und so sehe ich bei der Arbeit einfach nicht aus.“ Also: keine Kapitänsmütze aus dem Souvenirshop für ihn!

Heute jedenfalls hat alles gut geklappt. Die Hummerkinder sind frei und im Kasten – und Millionen am Fernsehschirm haben daran teil.



## „Mit Rat und Tat: Brücke zur Öffentlichkeit“

Das Wattenmeer und die Nordsee sind einzigartige Naturräume und wesentliche Wirtschaftsregionen zugleich. Die verschiedenen Interessen stehen dabei oft im Konflikt. Um nachhaltige Lösungen zu finden, ist es wichtig, wissenschaftliche Ergebnisse in gesellschaftliche und politische Entscheidungen einzubeziehen. Der Biologe Dr. Christian Buschbaum über die Arbeit des AWI-Nordseebüros, das 2012 eine Auszeichnung der Bundesinitiative „Land der Ideen“ erhielt.

Forschung in Wattenmeer und Nordsee ist Handarbeit. Regelmäßige Probennahmen geben Aufschluß über Veränderungen der Lebensgemeinschaften und ihre möglichen Ursachen. Fotos: C. Buschbaum

### Herr Dr. Buschbaum, Sie leiten das AWI-Nordseebüro. Was tut dieses Büro?

**Buschbaum:** Wir sind die Brücke zwischen Umweltforschung, Öffentlichkeit und Politik: Wer wissen will, was sich in der südöstlichen Nordsee gerade tut, kann sich bei uns umfassend informieren und beraten lassen. Das AWI bietet dafür eine breite Datengrundlage und viele Experten. Wir bündeln dieses Wissen und unterstützen damit gesellschaftliche Entscheidungsprozesse.

### Bei welchen Themen zum Beispiel?

**Buschbaum:** Etwa bei der Frage, wie mit der großen Zahl nicht heimischer Arten umgegangen werden soll, die zunehmend in Wattenmeer und Nordsee eingeschleppt werden. Wir untersuchen, welche Auswirkungen diese Organismen auf die hiesigen Lebensgemeinschaften haben. Oder ganz neu das Mikroplastik-Problem: Mit winzigen, fein verteilten Kunststoffteilchen im Meer entsteht eine ganz neue Müllbelastung. Auch hierzu halten wir fortlaufend Informationen bereit.

### An wen richten sich diese Informationen hauptsächlich?

**Buschbaum:** Vor allem an die Entscheidungsträger der Gesellschaft, etwa direkt an die Politik oder an Behörden wie das Bundesamt für Naturschutz oder auch die Landesämter für Umwelt und Naturschutz. Oft kommen diese mit konkre-

ten Fragen auf uns zu. Wir sagen dann, was dafür untersucht werden muss, definieren damit Forschungsschwerpunkte und liefern diese Daten dann auch.

### Dann arbeiten Sie eng mit den Behörden zusammen. Wie frei sind da die Ergebnisse?

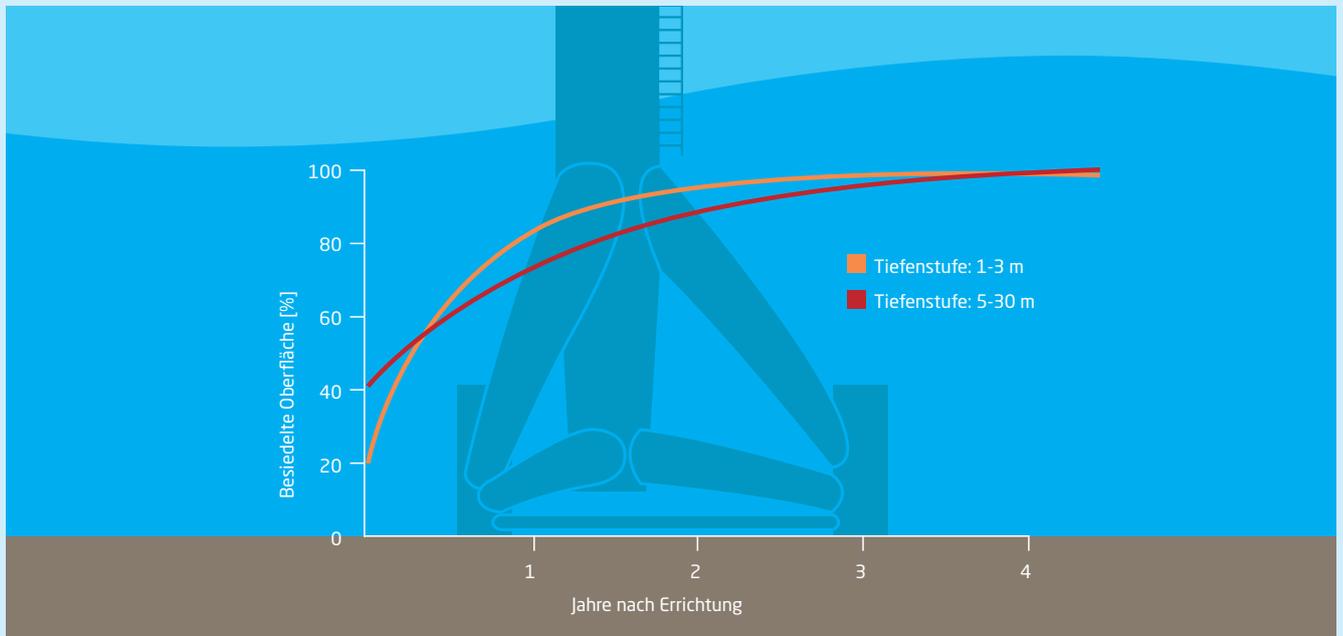
**Buschbaum:** Wir haben in der Tat eine Doppelfunktion. Wir stellen einerseits Daten aus unserer Grundlagenforschung zur Verfügung. Andererseits nehmen wir auch konkrete Fragen als Forschungsaufträge an. Was wir aber herausfinden, ist stets vollkommen frei von jeder Einflussnahme. Wir sagen immer klar und ungeschönt, was ist - verbunden mit Empfehlungen für weiteres Handeln.

### Was ist Ihr ganz persönliches Motiv dabei?

**Buschbaum:** Wie unsere Umwelt aussieht, nehmen viele nur noch online wahr. Ein Computer kann jedoch zum Beispiel keine Gerüche von Strand und Meer vermitteln. Man muss selbst in der Natur sein, um sie in ihrer Gesamtheit zu erfassen. Wenn wir es schaffen, dafür zu sensibilisieren und Information und Begeisterung zugleich zu vermitteln - dann wird die Bedeutung unserer Küstenlebensräume verstanden. Und es entsteht Bereitschaft, sie zu schützen und vielleicht auch, darin zu investieren.



Tiefenabhängige Besiedlungsdynamik auf der Unterwasserkonstruktion einer Offshore-Windenergieanlage.



### Energiewende am Meeresgrund

Die Offshore-Windindustrie hinterlässt Spuren im Meer. Das haben AWI-Forscher um Dr. Lars Gutow in einer Untersuchung im Auftrag des Bundesumweltministeriums herausgefunden. Das mächtige Fundament der Windräder bietet allerlei Meeresbewohnern, wie Muscheln, Seeanemonen und Würmern, einen neuen Lebensraum. Ihre Ausscheidungsprodukte sowie Strömungsänderungen um die Unterwasserbauwerke herum verändern den Meeresboden und die dort lebenden Tiergemeinschaften. Doch Windparks sorgen auch für Ruhe am Meeresgrund: Dort wird nicht gefischt, sodass sich die Tierpopulationen zum Beispiel von den zerstörerischen Grundschleppnetzen erholen können. Ob und wie sich die Effekte vieler Offshore-Windparks addieren, wollen die Wissenschaftler nun mithilfe von Modellen vorhersagen.



## Ansprechpartner im AWI

	Seite
Einleitung: Prof. Dr. Karen Wiltshire	7
Helgoland - Schatzkammer der Artenvielfalt / Prof. em. Dr. Heinz-Dieter Franke	10
Box: Bluehouse: Wissenschaft live erleben / Prof. Dr. Karen Wiltshire	11
Sylt - Wandel, Watt und Weltnaturerbe / Prof. em. Karsten Reise	12
Box: Gewaltige Natur / Prof. em. Karsten Reise	13
Polarregionen - Schlüsselgebiete des Klimageschehens / Dr. Paul Overduin und Dr. Ingeborg Bussmann	14
Box: Vom Dauerfrost zum Schmelzregime / Dr. Paul Overduin und Dr. Ingeborg Bussmann	15
Plankton à la carte / Prof. Dr. Maarten Boersma	18
Box: Nahrungsqualität: Viel Gehalt, wenig Substanz / Dr. Cédric Meunier	19
Extrawurst nach Planktonart / Dr. Martin Löder und Dr. Nicole Aberle-Malzahn	20
Vorwärts in die Vergangenheit / Dr. Arne Malzahn	21
Nordsee auf neuem Kurs? / Prof. Dr. Heinz-Dieter Franke und Prof. Dr. Karen Wiltshire	24
Box: Im Dauerdienst / Kristine Carstens	25
Vibrionen mögen's warm / Dr. Gunnar Gerdts und Dr. Antje Wichels	26
Detektivarbeit im Mikrokosmos / Dr. Alexandra Kraberg und Dr. Elena Shchekinova	27
Schmelzende Gletscher und trübes Wasser / Dr. habil. Doris Abele	30
Box: Klimageschichte aus Gletscherschutt / Prof. Dr. Christian Hass	31
Tauender Permafrost erwacht zum Leben / Prof. Dr. Hugues Lantuit	32
Arktische Küsten auf dem Rückzug / Prof. Dr. Hugues Lantuit	33
Waldspaziergang unter Wasser / Dr. Inka Bartsch	36
Box: Automatische Kartierung von oben / Dr. Inka Bartsch	37
Die Mathematik des Watt-Speiseplans / Dr. Harald Asmus	38
Das tauch(g)t was / Prof. Dr. Philipp Fischer	39
Forschung zu Gast / Prof. em. Dr. Otto Larink (TU Braunschweig) und Prof. Dr. Kai Bischoff (Universität Bremen)	42
Box: OPEN SEA: Schüler erforschen die Nordsee / Dr. Antje Wichels	43
Und bitte! Meeresforschung fürs Fernsehen / Dieter Klings und Dr. Folke Mehrrens	44
Box: Hummerkinder suchen Paten / Dr. Isabel Schmalenbach	45
Mit Rat und Tat: Brücke zur Öffentlichkeit / Dr. Christian Buschbaum, Dr. Gunnar Gerdts, Dr. Lars Gutow	46
Box: Energiewende am Meeresgrund / Dr. Lars Gutow, Dr. Jennifer Dannheim, Dr. Katharina Reichert, Dr. Roland Krone, Manuela Gusky	47

Nordsee und Polarregionen  
Untersuchungsgebiete der Küstenforscher



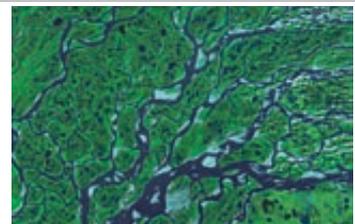
Vom Fressen und gefressen werden  
Marine Nahrungsnetze



Ausdauer gefragt  
Langzeitmessungen belegen Wandel im Ökosystem



Hotspots des Klimawandels  
Die Polarregionen



Aus der Luft, an Land und unter Wasser  
Methoden moderner Meeresforschung



Raus aus dem Elfenbeinturm  
Forschung für Studierende, Schüler, Politik und Gesellschaft



#### Impressum

Alfred-Wegener-Institut  
Helmholtz-Zentrum für Polar- und  
Meeresforschung  
Am Handelshafen 12  
D-27570 Bremerhaven  
Telefon +49(0)471/48 31-0  
Telefax +49(0)471/48 31-11 49  
E-Mail: info@awi.de  
www.awi.de

#### Redaktion und Konzeption:

Inhaltlich verantwortlich:  
Prof. Dr. Karen Wiltshire,  
stellv. Direktorin Alfred-Wegener-Institut

Claudia Pichler, Kommunikation & Medien  
Dr. Folke Mehrrens, Kommunikation & Medien

Copyright: 2. Auflage 2016,  
Alfred-Wegener-Institut

Gestaltung: Yves Nowak, Kommunikation & Medien  
Text: Cornelia Reichert, Daniela Schmidt  
Druck: Druckerei Brüggemann GmbH, Bremen  
Foto Titelseite: U. Nettelmann





Am Handelshafen 12  
27570 Bremerhaven  
Telefon 0471 4831-0  
Telefax 0471 4831-1149  
[www.awi.de](http://www.awi.de)

