

Victor Smetacek, Ulrich V. Bathmann, Ulf Riebesell, Volker H. Strass

Experimentelle Meeresforschung: Eisendüngung im Südpolarmeer

Einleitung

In den pelagischen Ökosystemen des offenen Ozeans leben die größten Tiere, die die Erde je hervorgebracht hat, doch die Grundlage ihrer Ernährung ist die Produktion von winzigen Organismen – den Cyanobakterien (früher Blaualgen genannt) und einzelligen Algen des Phytoplanktons. Das pelagische Reich der ozeanischen Wassermassen dehnt sich in einer durchschnittlich dreieinhalb Kilometer dicken Schicht über zwei Drittel der Erdoberfläche aus. Aufgrund der Fläche und des Volumens können somit das Pelagial und das Plankton als der typische Lebensraum bzw. die charakteristische Lebensform der Erde betrachtet werden. Auch von der Anzahl der Lebewesen her rechtfertigt das Plankton diesen Anspruch.

Die Planktonalgen im Ozean stellen nur 0,5 % der gesamten pflanzlichen Biomasse der Erde, gemessen in Tonnen Kohlenstoff. Ihr Gesamtumsatz dagegen – die durch Photosynthese jährlich erzeugte Produktion von organischer Substanz – kommt der Landpflanzen nahe: 50 gegenüber 100 Gigatonnen Kohlenstoff (Milliarden Tonnen) pro Jahr. Der hohe Umsatz bedeutet, dass die meisten Planktonalgen ebenso schnell gefressen werden, wie sie sich teilen. Die Algenfresser – von einzelligen Winzlingen der Protozoen über knapp mückengroße Ruderfußkrebse (Copepoden) des Zooplanktons bis hin zum garnelengroßen Krill – haben Größenordnungsmäßig die gleiche Gesamtbioasse wie die Planktonalgen.

Wie hoch die Tierbiomasse im Pelagial sein kann, wird durch das Beispiel des etwa 5 cm großen 1–2 g schweren antarktischen Krills deutlich. Man schätzt, dass die großen Bartenwale vor ihrer Dezimierung jährlich 200 Millionen Tonnen Krill gefressen haben. Damals betrug der Krillbestand vielleicht eine halbe Milliarde Tonnen, verteilt auf eine Fläche um den antarktischen Kontinent so groß wie Nordamerika (ca. 20 Millionen km²). Auf Quadratmeterfläche umgerechnet kommt man auf durchschnittlich 20 Tiere. Um einen Vergleich mit den uns vertrauten Landökosystemen zu schaffen, stelle man sich 20 Grashüpfer pro Quadratmeter Wiese vor, darüber einen Schwarm von vielen Tausend Zwergmücken (die Ruderfußkrebse), und man bekommt einen ersten groben Eindruck vom Tierreichtum im Pelagial.

Um weiteren Kontext zu schaffen: Die Biomasse der gesamten Menschheit beträgt heute weniger als die Hälfte des Krills: ca. 200 Millionen Tonnen. Der jährliche Fischfang aus den Weltmeeren stagniert seit Jahren bei etwa 70 Millionen Tonnen, was 7 Millionen Tonnen Kohlenstoff und etwa 0,02 % der Algenproduktion entspricht. Offensichtlich nutzt die Menschheit nur einen winzigen Teil der marinen Produktion. Durch die herkömmliche Ausbeutung von wilden Fischbeständen lässt sich der Ertrag nicht mehr steigern, zumal die Nutzfischbestände auf begrenzte, besonders produktive Gebiete beschränkt sind. Durch nachhaltige Fischereipolitik könnten die Erträge stabilisiert und etwas erhöht werden. Auch eine große Krillfischerei würde daran nichts Wesentliches



ändern. An Land ist die Nutzung der pflanzlichen Produktion durch den Menschen für Nahrung, Tierfutter und Holz viel intensiver, weil technisch einfacher. Es liegt auf der Hand, dass neue Wege der Meeresnutzung erkundet werden müssen, die den gegenwärtigen Stand des Jäger- und Sammlertums ergänzen. Dafür ist ein besseres Verständnis der pelagischen Ökosysteme, wie wir in diesem Artikel zeigen wollen, Voraussetzung.

Plankton und Klima

Das marine Phytoplankton erzeugt nicht nur Nahrung für die Tierwelt. Es spielt auch eine entscheidende Rolle im globalen Kohlenstoffhaushalt, indem es beträchtliche Mengen von Kohlendioxid der Atmosphäre entzieht und in die tiefen Wasserschichten des Ozeans sowie ins Sediment verlagert. Der Antrieb dieser biologischen Kohlenstoffpumpe erfolgt durch das Wachstum des Phytoplanktons, das CO₂ in der lichtdurchfluteten Oberflächenschicht in Biomasse umwandelt. Hierdurch wird im Wasser ein Defizit erzeugt, das durch die Lösung von atmosphärischem CO₂ wieder ausgeglichen wird. Ein Großteil der von Algen erzeugten organischen Materie wird in der Oberflächenschicht von Bakterien und Tieren wieder zu CO₂ veratmet, aber ein Teil sinkt in tiefere Schichten oder bis zum Boden und wird erst dort abgebaut. Ein Rest verbleibt im Sediment. Der Teil, der aus der Oberflächenschicht herausfällt, ist dem Austausch mit der Atmosphäre für längere Zeit entzogen. Es verdichten sich die Hinweise, dass Schwankungen in der Leistung der biologischen Pumpe mit Klimawechseln in der Erdgeschichte einhergegangen sind.

Zurzeit werden große Anstrengungen unternommen, die jüngste Erdgeschichte detailliert zu rekonstruieren und mit den heutigen globalen Prozessen in Beziehung zu setzen. Daten aus einem Eisbohrkern aus der zentralen Antarktis, der 420 000 Jahre Erdgeschichte dokumentiert, zeigen, dass das Kommen und Gehen der Eiszeiten die- ser Zeitspanne von rhythmischen Veränderungen in der Stellung der Erde zur Sonne beeinflusst wurden. Allerdings sind die Unterschiede in der Sonneneinstrahlung

zwischen Kalt- und Warmzeiten zu gering, um die großen Fluktuationen der globalen Temperatur zu erklären. Zudem sind die Klimawechsel viel schneller aufgetreten, als man dies aufgrund der allmählichen Änderungen im Verlauf der Erdbahn erwarten würde. Es muss daher Prozessketten auf der Erde geben, die die Effekte veränderter Einstrahlung verstärken. Nur wenige sind bisher hinreichend verstanden worden, um sie quantitativ zu beschreiben.

Der Eisbohrkern hat auch gezeigt, dass die globalen Temperaturänderungen mit Schwankungen in der Konzentration von Kohlendioxid in der Atmosphäre einhergegangen sind. Der CO₂-Anteil liegt bei 0,018 % in Kalt- bzw. 0,028 % in Warmzeiten. Was dabei Ursache und was Wirkung ist und welches die Quellen und Senken des CO₂ sind, wird gegenwärtig intensiv diskutiert. Über die zahlreichen ineinander greifenden Prozesse, die für die wiederkehrenden Muster der CO₂-Fluktuationen verantwortlich sind, sowie die Regelmechanismen, die gleichbleibende CO₂-Konzentrationen während der jeweiligen Klimaperioden stabilisieren, werden noch Vermutungen angestellt. Vor dem Hintergrund steigender CO₂-Konzentrationen während der letzten 100 Jahre (heute bei 0,057 %) ist die Beantwortung dieser Fragen entscheidend, um verlässliche Klimavorhersagen wagen zu können als Grundlage für politische Handlungsempfehlungen.

Der Ozean enthält fünfzigmal mehr CO₂ als die Atmosphäre (heute bei 760 Gigatonnen Kohlenstoff). Deshalb liegt die Vermutung nahe, dass Verschiebungen in der Austauschrate zwischen Wasser und Luft für die CO₂-Zyklen verantwortlich sind. Die derzeitigen Überlegungen konzentrieren sich zunehmend auf klimabedingte Produktivitätsschwankungen im Ozean und die damit gekoppelte Leistung der biologischen Pumpe. Je mehr Phytoplanktonbiomasse in der oberflächennahen Schicht aufgebaut wird, desto stärker arbeitet die Pumpe. Das Wachstum von Planktonalgen wird von Lichtangebot und Nährstoffverfügbarkeit bestimmt. Die Algen sind wie die Landpflanzen auf Mineralstoffe angewiesen, vor allem auf Stickstoff- und Phosphorverbindungen, daneben in wechselndem Umfang auf Kieselsäure, Eisen und andere Spurenstoffe. In den meisten Gebieten des Ozeans einschließlich der Küstenmeere begrenzt der Pflanzennährstoff Nitrat die Menge an Biomasse, die aufgebaut werden kann. Aber in drei ausgedehnten Ozeanregionen – dem äquatorialen und dem subarktischen Pazifik und dem gesamten Südpolarmeer – ist die Phytoplanktonproduktion viel geringer, als aufgrund der Licht- und Nährstoffverhältnisse zu erwarten wäre. Dieses Rätsel wurde in den letzten zehn Jahren geklärt: Eisen ist Mangelfaktor in diesen Regionen.

Die kontinentale Kruste besteht zu etwa 10 % aus Eisen. Wegen seiner geringen Löslichkeit im Meerwasser ist aber im landfernen Ozean dieses für alle Lebewesen essentielle Element Mangelware. Schon lange wurde vermutet, dass die Verfügbarkeit von Eisen das Wachstum der Planktonalgen begrenzt. Die Bestätigung wurde aber erst im Laufe des letzten Jahrzehnts durch die Entwicklung von ultrasauberen Messmethoden erbracht. Der amerikanische Meeresbiologe John Martin wies nach, dass in den landfernen, unproduktiven Ozeangebieten die Eisenkonzentrationen etwa 10 Nanogramm/Liter (entspricht 1 Gramm Eisen gelöst in

10 Milliarden kg Meerwasser) betragen. Die Eisenwerte in den produktiven Küstenmeeren liegen zehnfach höher.

Da Eisen im Meerwasser schnell zu unlöslichem Rost umgewandelt wird und aus der Wassersäule heraus sinkt, muss stetig neues Eisen dem Ozean zugeführt werden, um den Bedarf der Organismen zu decken. Die Hauptquelle des Eisens im offenen Ozean ist der mit dem Wind heran gewehrte, kontinentale Staub. Staubreiche Schichten im Eisbohrkern zeigen, dass in den trockenen Eiszeiten die Zufuhr von Staub mehrere Größenordnungen höher lag als in den Warmzeiten einschließlich heute. Aus der Korrelation zwischen Staubeintrag in den Südlichen Ozean und CO₂-Konzentrationen in der Atmosphäre formulierte John Martin die Eisenhypothese:

Wenn der Südliche Ozean während der Eiszeiten ebenso produktiv war wie es der Nordatlantik dank des Sahelstaubs heute ist, dann ließe sich ein beträchtlicher Teil der CO₂-Schwankungen zwischen Warm- und Kaltzeiten erklären. In den Kaltzeiten war die biologische CO₂-Pumpe in diesen Regionen viel stärker als heute. Um seine Hypothese zu testen, ließ Martin Anfang der neunziger Jahre ein Eisenübungsexperiment (IRONEX I) im nährsalzreichen jedoch planktonarmen Wasser des Äquatorialen Pazifiks durchführen. Diese Wassermasse gilt wie der Südliche Ozean als eisenlimitiert. Eine deutliche Stimulation des Planktonwachstums wurde festgestellt, aber die durch Düngung erzeugte Planktonwolke wurde innerhalb weniger Tage von einer 30 m dicken Wasserschicht überlagert und konnte nicht mehr verfolgt werden. Bei einem zweiten Versuch (IRONEX II) wurde Eisenlösung mehrmals ausgebracht mit frappierendem Erfolg: In wenigen Tagen wuchs eine Algenblüte heran, die das klare, blaue Wasser grünlich verfärbte. Ein drittes Experiment (SOIREE) folgte im Februar 1999 (Spätsommer auf der Südhälfte) von einem neuseeländischen Schiff in einem verhältnismäßig ruhigen Teil des Subarktischen Südpazifik. Das Ergebnis war hier eine Phytoplanktonblüte von über 100 Quadratkilometern Ausdehnung. Bei allen diesen Experimenten konnte aus Mangel an Schiffszeit das Schicksal der Blüten nicht verfolgt werden. Dies ist aber entscheidend für den Kohlenstoffhaushalt: Verbleibt die von der Blüte erzeugte organische Materie in der Deckschicht und wird dort von Bakterien und Zooplankton abgebaut, findet keine langfristige Aufnahme des CO₂ statt. Sinkt dagegen ein Teil dieser Materie aus der oberflächennahen Schicht ab, entzieht die biologische Pumpe der Atmosphäre entsprechend viel CO₂, und zwar je nach der Schicht, die erreicht wird, über Jahrzehnte, Jahrhunderte oder Jahrtausende.

Der antarktische zirkumpolare Ozean – das Südpolarmeer

Der größte Teil des Südpolarmeeres besteht aus einem breiten Wasserring – dem Antarktischen Zirkumpolarstrom (AZS) –, der den antarktischen Kontinent ostwärts umströmt. Der AZS lässt sich in mehrere Gürtel unterteilen, die jeweils durch Fronten – scharfe Temperatur- oder Salzgehaltgradienten – voneinander getrennt sind. Die Polarfront ist die markanteste Grenze und unterteilt den AZS in zwei Ringe: die Polarfrontzone (PFZ) im Norden und die Antarktische Zone (AZ) im Süden. Oberflächenwasser vom Nordrand der PFZ neigt dazu, unter

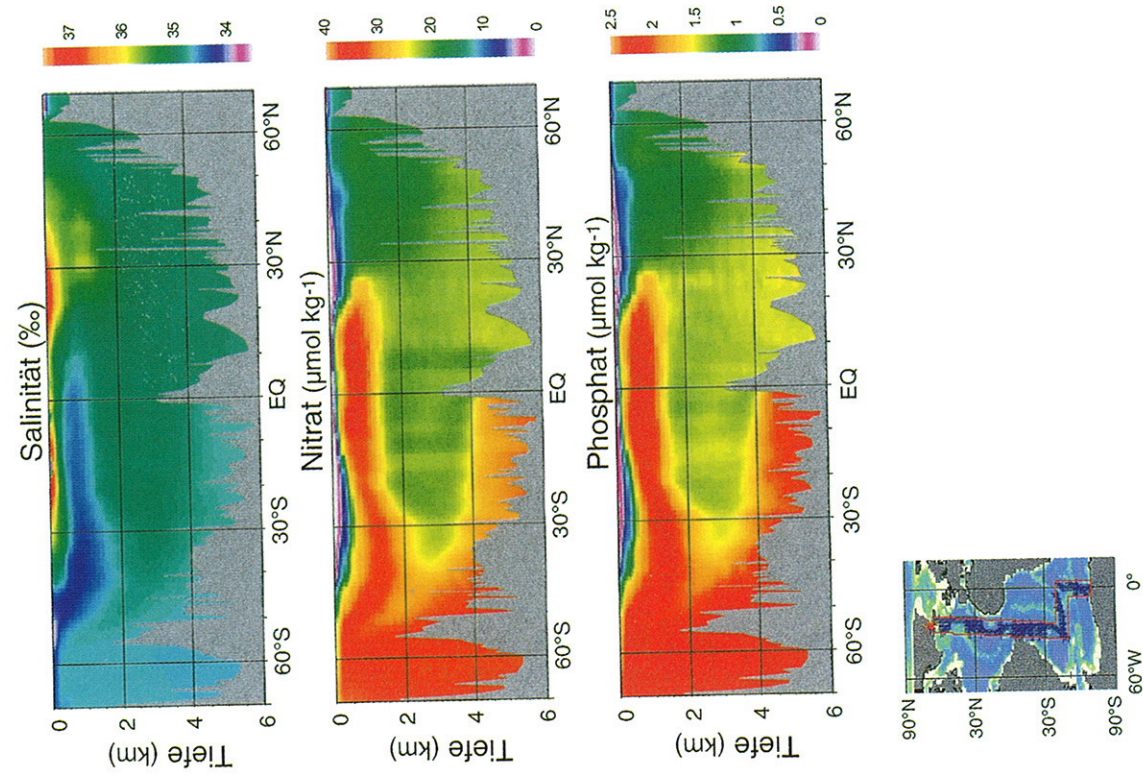


Abb. 1: Zusammen mit dem salzarmen antarktischen Zwischenwasser (oberes Bild) werden im Zirkumpolarstrom auch die Pflanzen-Nährsalze Nitrat und Phosphat (mittleres und unteres Bild) von der Oberfläche in eine Tiefe von etwa 1000 m verfrachtet, in der sie für einen Zeitraum von schätzungsweise 100 Jahren verbleiben und sich dabei im Atlantik nordwärts ausbreiten. Die gezeigten Daten wurden während des 'World Ocean Circulation Experiments' auf den im Bild links unten dunkelblau markierten Positionen gewonnen und mit dem Programm 'Ocean Data View' von R. Schlitzer im Alfred-Wegener-Institut visualisiert

das wärmere und daher leichtere Wasser der benachbarten subantarktischen Zone abzutauchen (Abb. 1). Da das Plankton des AZS in seinem Wachstum eisenlimitiert ist, werden große Mengen der gelösten Nährsalze Nitrat und Phosphat mit dem kalten Wasser unverbraucht in die Tiefe befördert. Wäre genug Eisen vorhanden, würden die Algen schneller wachsen, mehr Nährsalze aufnehmen und dabei auch wesentlich mehr Kohlenstoff binden, der dann mit absackendem PFZ-Wasser für einige Jahrhunderte in die Tiefen des Ozeans verschwinden würde. Einfache Rechenmodelle zeigen, dass langfristig etwa 50 – 60 Milliarden Tonnen Kohlenstoff auf diesem Weg der Atmosphäre entzogen werden könnten. Das entspricht in etwa der Menge, die durch menschliche Aktivitäten in einem Jahrzehnt in die Atmosphäre gelangt. Allerdings

beruhen die Modelle auf Annahmen, die überprüft werden müssen: Wie wir weiter unten zeigen werden, kommt es ganz auf die Algenarten an, die durch die Düngung stimuliert werden. Außerdem gehen die Modelle von einer stetigen Zufuhr von Eisen aus: der Zustand, der im Nordatlantik heute herrscht und während der Eiszeiten auch im AZS geherrscht haben soll.

Normalerweise kommen Phytoplankton-Blüten im AZS nur an relativ eng begrenzten Streifen entlang der Fronten vor. Aber mit FS „POLARSTERN“ im Südjah 1992 trafen wir ausgedehnte Planktonblüten in der gesamten etwa 600 km breiten PFZ an. Die Eisenkonzentrationen im planktonreichen Wasser lagen eine Größenordnung höher als üblich für diese Gegend. Wahrscheinlich stammte das Eisen von den vielen riesigen Eisbergen, denen wir in diesem Jahr in dem gesamten Untersuchungsgebiet begegneten. Sie stammten von einem riesigen Eisstück, das sich einige Jahre zuvor vom aufschwimmenden Schelfeis an der Innenflanke der Antarktischen Halbinsel gelöst hatte und in diesem Jahr im Zirkumpolarstrom zerfiel. Die Eisberge enthielten den Staub von Jahrtausenden und fügten diesen beim Abschmelzen der Oberflächenschicht des Meeres zu. Obwohl Eisberge über die volle Breite des AZS dümpelten, blieb das Wasser südlich der Polarfront eisen- und planktonarm, weil die Temperatur dort unter 0° C lag und die Eisberge daher nicht schmolzen. Drei getrennte, jeweils von verschiedenen Arten von Kieselalgen dominierte Blüten wurden gefunden, die sich in ihrem Absinkenverhalten unterschieden. Diese Beobachtung zeigte, dass Planktonblüten auch durch natürliche Eisendüngung erzeugt werden und dass je nach Artenzusammensetzung des Planktons die Kohlenstoffpumpe unterschiedlich arbeitet.

EisenEx

Um die Eisenhypothese in dem für die Klimaforschung interessanten Gebiet der Polarfrontzone etwa in der Mitte zwischen Südafrika und dem Antarktischen Kontinent (Abb. 2) zu testen, wurde das vierte Eisendüngungsexperiment (EisenEx) von Forschern des Alfred-Wegener-Instituts an Bord von FS „POLARSTERN“ organisiert und

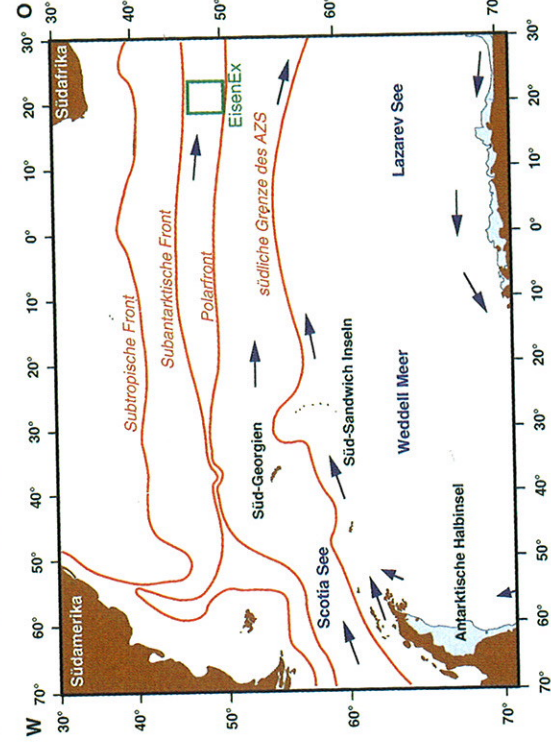


Abb. 2: Das Untersuchungsgebiet von EisenEx im November 2000 in der Polarfrontzone des Südozeans zwischen Südafrika und der Antarktis

geleitet. Das übergeordnete Ziel des Experiments, das im sturmreichen Südf Frühjahr (November 2000) stattfand, war, die Wechselwirkung zwischen der Biologie des Planktons und der Physik sowie Biogeochemie des Ozeans zu erfassen und somit einen Beitrag zum Verständnis der Erde als funktionierendes Gesamtsystem zu liefern. Das Experiment wurde von 54 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern durchgeführt, die aus 15 Ländern stammten und die Disziplinen der marinen Physik, Chemie und Biologie repräsentierten.

Das Experimentiergebiet musste sorgfältig ausgewählt werden. Der AZS ist von Fronten durchzogen, die auf Satellitenbildern wie Flüsse erscheinen, die sich durch eine breite Ebene schlängeln. Mit dem Mäandrieren der Fronten werden Wirbel abgeschnürt, die ihren sich drehenden Kern für längere Zeiträume vor der Vermischung mit Umgebungswasser bewahren. Wir planten, unser Experiment im strömungsarmen Auge eines solchen Wirbels durchzuführen.

Wirbel im offenen Ozean können vom fahrenden Schiff und bedingt auch von Satelliten geortet werden. Durch Unterschiede in Temperatur oder im Planktongehalt des Oberflächenwassers heben sie sich vom Umgebungswasser ab. Da Wirbel sich aus Fronten – definiert durch maximale Dichtegradienten – abschnüren, besitzen sie eine andere Dichte als die Umgebung, in die sie sich hinein bewegen. Wirbel mit größerer Dichte liegen zur Mitte hin tiefer und umgekehrt. Der Unterschied beträgt einige Dezimeter zwischen Wirbelmitte und -rand und kann von Satelliten mittels eines sehr fein auflösenden Höhenmessers ermittelt werden. Vom fahrenden Schiff können die Strömungsgeschwindigkeiten mit einem speziellen Echolot aufgenommen werden, das die Geschwindigkeit einzelner Partikel in verschiedenen Schichten der Wassersäule bis 300 m Tiefe durch Ausnutzung des Doppler-Effekts misst: einem sogenannten Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP).

Die Vorerkundungen in der PFZ zeigten, dass geeignete Bedingungen für das Experiment vorlagen: extrem eisenarmes Wasser im ganzen Gebiet sowie eine dünne aber artenreiche Planktongemeinschaft, deren Veränderungen im Laufe des Experimentes interessante Rückschlüsse über Auswahlprozesse in diesem Lebensraum erlauben würden. Messungen der Photosyntheseleistung der Algenzellen ergaben, dass sie nur 30 % ihres Potentials erreichte – höchstwahrscheinlich wegen Eisenmangel, denn die Lichtbedingungen waren gut. Nur die außergewöhnlich hohe Zahl der Millimeter großen Ruderfußkrebse (Copepoden) im Gebiet (mehr als 15 pro Liter) lieferte Grund zur Beunruhigung, denn sie hätten durch ihren Fraßdruck eine wachsende Blüte im Keime ersticken können.

Bereits in der ersten Woche konnte das Physikerteam einen geeigneten Wirbel ausfindig machen, vermessen und eine Treibboje in dessen strömungsarmem Auge ausbringen (Abb. 3). Der Wirbel hatte etwa 150 km Durchmesser: eine sich drehende Wasserscheibe mit einer 20 cm tiefen Delle in der Mitte. Vor der Düngung wurden die physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften des von der Boje markierten Wasserkörpers gemessen. Anschließend wurden 4 Tonnen Eisensulfat gelöst in 50 Kubikmeter Seewasser entlang einer 70 km langen Spirale mit 7 km Durchmesser um die treibende Boje durch einen 5 cm weiten Schlauch in

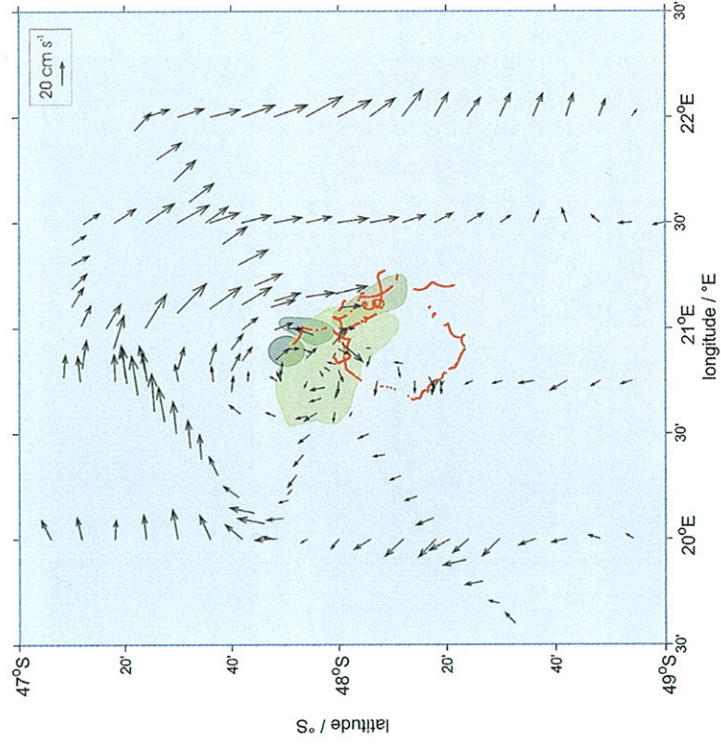


Abb. 3: Verlagerung und Ausbreitung des mit dem Spurenstoff SF_6 markierten gedüngten Flecks (Farbflächen) innerhalb des für EisenEx ausgewählten Wirbels. Die Strömungsvektoren wurden vom Schiff aus mittels eines akustischen Doppler-Stromprofilers gemessen und zeigen eine Wirbelzirkulation im Uhrzeigersinn. Die durchgezogenen Linien sind Trajektorien der Driftbojen. Während die Treibbojen mit dem gedüngten Fleck im südlichen Bereich des Wirbelauges trieben, konnte wegen widrigen Sturmwetters keine Kartierung der SF_6 -Konzentration vorgenommen werden (Unveröffentlichte Daten von V. H. Strass, B. Cisevski, M.-J. Messias und A. Watson)

die See gelassen. Die Entfernung zwischen den Spiralkursen betrug knapp einen Kilometer, und „POLARSTERN“ musste alle 5 Minuten etwas drehen, um eine allmählich zunehmende Entfernung von der Boje zu halten.

Wir verwendeten das gleiche Eisensalz, das in Gärtnereien zur Moosbekämpfung in Rasenflächen verkauft wird. Dieses Eisensulfat liegt in seiner reduzierten, löslichen Form vor und ist im angesäuerten Wasser stabil. Seewasser ist aber leicht alkalisch, so wird diese Form des Eisens nach Zugabe in die See in Minuten bis Stunden oxidiert und in unlöslichen Rost umgewandelt. Dieser Rost ist sehr fein verteilt und müsste im Wasser wenigstens für Wochen verbleiben. Allerdings verschwand in früheren Experimenten das zugeführte Eisen binnen weniger Tage, aber der gedüngte Fleck konnte auch weiterhin „geortet“ werden, weil ein inerter Stoff – Schwefelhexafluorid (SF_6) – der Eisenlösung beigemischt war. Ein englisches Team, das in der Messung unglaublich geringer Konzentrationen von SF_6 versiert ist, hatte die Aufgabe, den gedüngten Fleck immer wieder aufzuspüren und „im Auge“ zu behalten. Der Leiter des Teams – Prof. Andy Watson – war an allen bisherigen Eisendüngungsexperimenten beteiligt. Nur 50 Gramm SF_6 wurde den 50 Kubikmetern Eisensulfatlösung beigemischt, und diese Menge reichte aus, um mehr als 500 Quadratkilometer Ozeanoberfläche messbar zu markieren. Die Messung

des Eisens, das unter ultrasauberer Methoden beprobt werden muss, oblag einer niederländischen Gruppe. Nach der Düngung dampften wir zum Rand des Wirbels und führten dieselben Messungen durch wie an der Treibboje, um die Prozesse im gedüngten Fleck mit denen außerhalb zu vergleichen. Im Fleck, den wir leicht wiederfanden, stellten wir schon nach einem Tag die ersten Anzeichen erhöhter Algenaktivität fest. Das Hochgeschwindigkeits-Fluorometer, das die Photosyntheseleistung der Algen im Bereich von Millisekunden messen kann, zeigte, dass die Algen im Fleck die aufgenommene Sonnenlichtenergie effizienter zur Synthese organischer Kohlenstoffverbindungen nutzten als die außerhalb.

Der Wirbel lag bei etwa 48°S mitten zwischen den „Roaring Forties“ und den „Furious Fifties“, und der erste Sturm traf uns fünf Tage nach der Düngung. Glücklicherweise befanden wir uns auf der behäbigen „POLARSTERN“, die den hohen Wellen mit ziemlicher Gelassenheit trotzte. Da die See zu rau war, um Stationsarbeit zu leisten, erkundeten wir die Lage des Flecks vom fahrenden Schiff. Erfreulicherweise gehorchte der Fleck dem Strömungsmuster des Wirbels (Abb. 5) und wurde vom starken Westwind nicht „verweht“. Obwohl die Wachstumsraten der Algen sich weiterhin erhöhten, wurden die ersten Anzeichen einer deutlichen Zunahme an Algenbiomasse im Fleck erst nach einer Woche sichtbar (Abb. 4). Die „verschwundene“ Biomasse (die Differenz zwischen der täglichen Produktionsrate und der Zunahme an Algenbiomasse) war wohl ganz überwiegend vom Zooplankton aufgenommen worden, das offensichtlich mit einer Erhöhung der Fressaktivität auf das schnellere Wachstum der Algen reagierte. Sogar die Bakterien erhöhten ihre Wachstumsrate unmittelbar nach der Düngung, indem sie mehr Enzyme aktivierten.

Die nächsten zwei Wochen des Experiments verbrachten wir mit vergleichenden Beprobungen der Wasserkörper inner- und außerhalb des Flecks. Zwischendurch vermaßen wir grobkrümmig die Lage des Gesamtflecks, der sich weiterhin im Wirbelaue drehte und ausbreitete. Das Zentrum des Flecks wurde zwei weitere Male mit Eisen gedüngt. Das Wetter blieb stürmisch, und dichte Bewölkung und Nebel hinderten das gedüngte Plankton durch Lichtmangel am schnellen Wachstum. Hinzu kam die tiefe Durchmischung, die die wachsende Algenpopulation verdünnte und Teile davon hinunter in die Dunkelheit beförderte. Nichtsdestotrotz: Drei Wochen nach der ersten Düngung, als die verfügbare Schiffszeit abgelaufen war und „POLARSTERN“ nach Norden dampfen musste, lag die höchste Chlorophyllkonzentration (ein Maß für Algenbiomasse) im Fleck bei 2,84 mg Chl/m³ (Abb. 4). Die Werte außerhalb waren bei konstant 0,5 mg Chl/m³ geblieben. In dieser Zeit hatte die Blüte etwa zwei Runden im Auge des Wirbels gedreht und sich über das gesamte Wirbelaue mit einer Ausdehnung von 900 km² ausgebreitet (Abb. 5). Die Boje hat in der Zeit etwa 120 km zurückgelegt. Ein Wasserkörper in der schnellen Strömung auf beiden Seiten des Wirbels wäre in derselben Zeit 500 km nach Osten getrieben.

In der Auswertephase nach dem Experiment wird ein Gesamtbudget des Düngeeffekts ermittelt. Durch das Wachstum der Algen werden im umgebenden Wasser Defizite in CO₂-, Nitrat-, Phosphat- und Silikatkonzentrationen erzeugt, die Biomasse anderer Ökosystemkomponenten wie Bakterien, Zooplankton und deren Abfallpro-

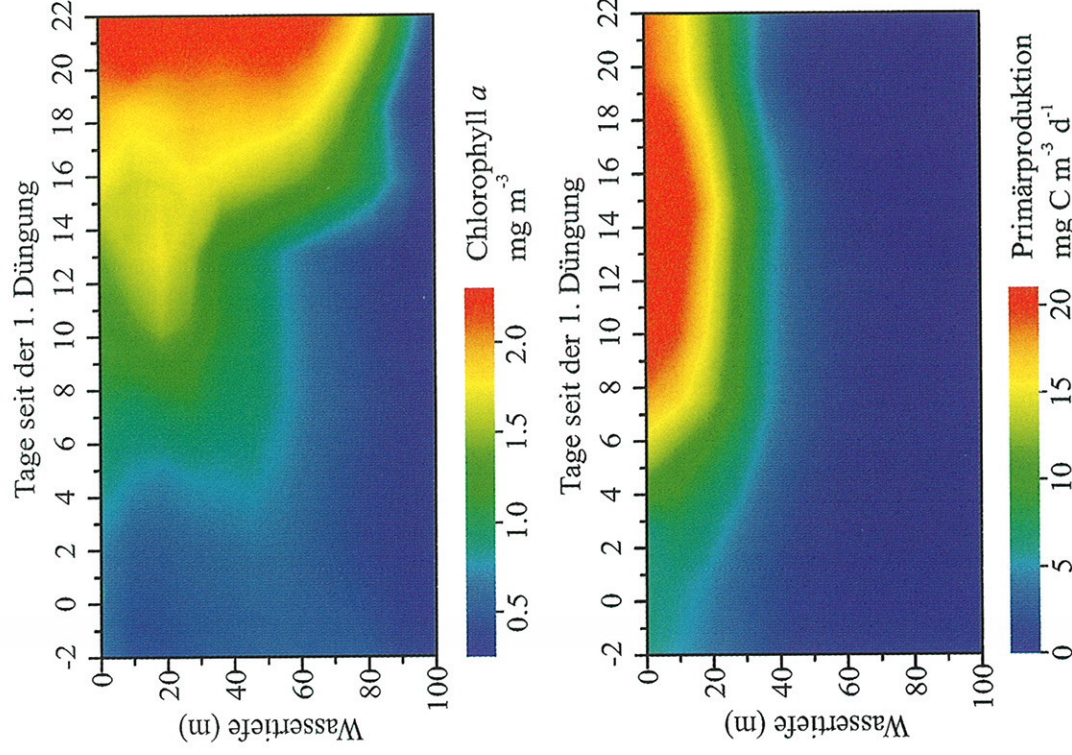


Abb. 4: Zeitlicher Verlauf der Chlorophyll-*a*-Konzentration (oben) und Primärproduktion (unten) im Düngungsgebiet nach der ersten Eisenzugabe (Tag 0) in den obersten 100 m der Wassersäule. Außerhalb des gedüngten Flecks traten über den Beobachtungszeitraum keine nennenswerten Änderungen gegenüber den an Tag 0 gemessenen Werten auf (Unveröffentlichte Daten von U. Riebesell und F. Gervais)

dukte (Kot) nimmt zu. In der Wassersäule mit den höchsten Chlorophyllkonzentrationen hatten Nitrat- und Phosphatgehalte um nur 10 % abgenommen, während Silikat um 30 % sank. Die niedrigsten CO₂-Konzentrationen im gedüngten Fleck (Abb. 5) entsprachen ca. 7 g/m³ aufgebautem organischem Kohlenstoff. Wäre das gesamte Nitrat dank der Eisendüngung in Algenbiomasse umgewandelt worden, wären Chlorophyllkonzentrationen von 50 mg Chl/m³ zu erwarten gewesen, d.h. das zwanzigfache des durch die Eisendüngung erreichten Wertes. Die entsprechende Menge an organischem Kohlenstoff in einer 60 m tiefen Wassersäule entspräche dann etwa 100 g C/m³ (etwa ein Kilogramm Biomasse, die Hälfte davon Eiweiß). Diese Zahlen spiegeln das enorme Potential dieser Gewässer für die Erzeugung von Biomasse und die entsprechende Aufnahme von CO₂ aus der Atmosphäre wider.

Während der ersten zwei Wochen nach der Düngung war es nicht klar, welche der vielen im Wirbel vertretenen Phytoplanktongruppen für die dreifache Zunahme im Chlorophyllgehalt verantwortlich waren. Es schien, als

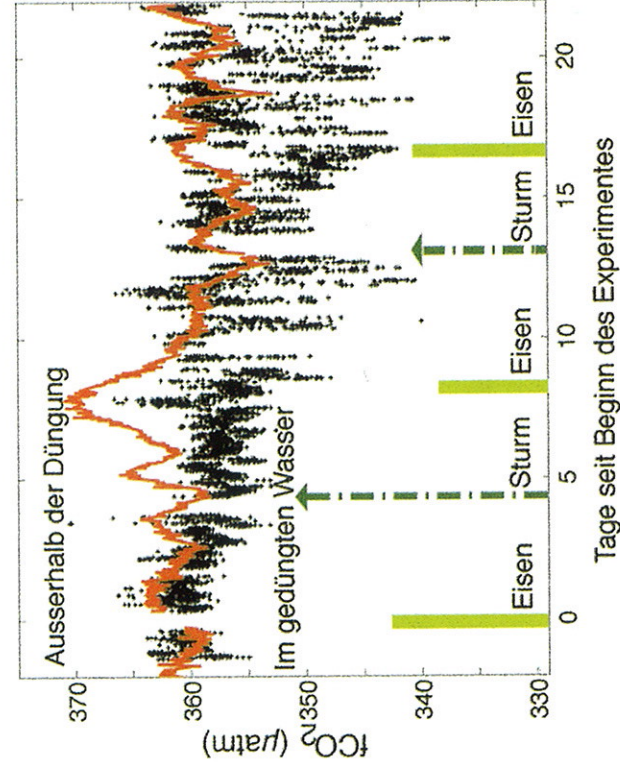


Abb. 5: Kontinuierliche Messung des CO_2 -Partialdrucks im Oberflächenwasser (schwarz) sowie in der darüber liegenden Atmosphäre (rot) im Untersuchungsgebiet. Die ausgeprägten Schwankungen im CO_2 -Gehalt des Oberflächenwassers erklären sich aus der Tatsache, dass „POLARSTERN“ im Verlauf des Experimentes fortwährend zwischen dem gedüngten Flecken und dem Umgebungsgelände hin und her pendelte. Sinkende CO_2 -Werte innerhalb des gedüngten Fleckens (unterer Rand der Schwankungsbreite) zeigen eine vermehrte CO_2 -Zehrung nach Eisenzugabe an. Demgegenüber blieben die Werte außerhalb des Fleckens nahezu konstant (oberer Rand). Grüne Balken zeigen die Zeitpunkte der Eisenzugabe an. Die zunehmende CO_2 -Zehrung innerhalb des Düngungsgebietes wurde durch heftige Stürme (gestrichelte Pfeile) wiederholt unterbrochen, trat aber im Anschluss daran schnell wieder ein (Unveröffentlichte Daten von D. Bakker und A. Watson)

hätte das Eisen zunächst alle Gruppen etwa gleichmäßig gestärkt. Die anfängliche Planktondiversität im Wirbel war außergewöhnlich hoch, weil das Wasser sich von der Polarfront im Süden abgelöst hatte und große Kieselalgenarten sowie Kolonien der Schaumalge *Phaeocystis* (Abb. 6d), die für antarktische Gewässer typisch sind, mit sich nach Norden trug. Hinzu kamen subantarktische Gruppen wie Dinoflagellaten, Coccolithophoriden (Kalkalgen) sowie winzige Cyanobakterien (Blualgen), die mit wärmerem, leichterem Oberflächenwasser aus dem Norden eingetragen und eingemischt wurden.

Die kleinsten chlorophyllhaltigen Zellen in unserer Blüte gehörten zu den Cyanobakterien und sind ein Tausendstel Millimeter im Durchmesser groß, während die längste Art eine stabförmige Kieselalge von 2 mm Länge ist. Dieser tausendfache Größenunterschied entspricht dem zwischen Moosen und Bäumen. Wachstumsraten, ökologische Präferenzen und Lebenszyklen dieser Planktonarten unterscheiden sich beträchtlich. Da das Schicksal des von der gedüngten Gemeinschaft erzeugten organischen Kohlenstoffs davon abhängt, welche Gruppe und Größenklasse die meiste Biomasse aufbaut, haben wir die Verschiebungen in der Zusammensetzung der Gemeinschaft eingehend verfolgt. Aufgrund physikalischer

schwer Gesetzmäßigkeiten müssten die kleinsten Zellen die höchsten Wachstumsgeschwindigkeiten aufweisen. Aber sie werden von einer großen Vielfalt von Einzellern (Protozoen) gefressen, die nur etwas größer als ihre Futterorganismen sind. Bei ausreichendem Futterangebot können Protozoen sogar schneller wachsen als die Algen, die von der Lichtzufuhr abhängig sind. Das größere Zooplankton weist sehr unterschiedliche Wachstumsraten auf. Während die Krebstiere (Copepoden und Krill) sich über Eier und Larven fortpflanzen und Monate bis Jahre für ihre Lebenszyklen benötigen, können sich die einige Zentimeter großen, aber wasserreichen Salpen durch Knospung vermehren und unmittelbar auf ein erhöhtes Nahrungsangebot reagieren. Beide Gruppen, die mit Netzen und Echolot erfasst wurden, waren in erheblicher Anzahl vertreten. Die Daten zeigen, dass im Fleck mehr kleine Larvenstadien dieser Krebse existierten als außerhalb. Diese Zooplankter führen vertikale Wanderungen während der Dämmerungen durch. Abends steigen sie auf, um in der oberflächennahen Schicht während der Nacht zu fressen; morgens tauchen sie ab, um den sich visuell orientierenden Fressfeinden zu entgehen.

Der Zirkumpolarstrom ist für seine großen Kieselalgen bekannt, deren Schalen im darunter liegenden Sediment in solchen Mengen akkumulieren, dass diese Region als die größte Senke für Silizium im Weltmeer gilt. Zu Anfang unseres Experiments wuchsen mehrere Kieselalgenarten heran, aber während der dritten Woche übernahm eine Art der kosmopolitischen Gattung *Pseudonitzschia* die Führung (Abb. 6a). Ihre Zellen sind nadelförmig und an den Spitzen miteinander zu langen Ketten verklebt. Als wir das Untersuchungsgebiet verließen, bestanden die Ketten aus mehr als 50 Zellen und hatten somit Millimeterlänge erreicht. Diese Gattung ist im Zirkumpolarstrom sehr häufig, wie auch die andere dominante Art: *Fragilaritopsis kerguelensis* (Abb. 6b), die ebenfalls mit ihrem Wachstumsschub in der dritten Woche begann. Sie fällt durch ihre sehr dicken Schalen auf, besonders im Vergleich mit der zierlichen *Pseudonitzschia*. *Fragilaritopsis*-Zellen sind elliptisch und mit ihren gesamten Flächen aneinander zu Ketten verklebt, die wie Patronengürtel aussehen. Am Anfang waren die Ketten kurz, aber zum Schluss tauchten Ketten mit mehr als 150 Zellen auf. *Fragilaritopsis*-Schalen sind im darunter liegenden Sediment besonders häufig. Die dritte dominante Art (*Corethron*, Abb. 6c), die sich wie die vorigen Arten auch in den Eisbergblüten massenhaft vermehrt hatte, sieht ganz anders aus. Die Zellen sind groß und mit Kränzen aus langen Stacheln an beiden Enden versehen, die wie die Rippen eines Regenschirms aussehen. Die langen Stacheln sind dicht mit spitzen Widerhaken besetzt. Die Zellen erscheinen sehr gut geschützt – wie Kakteen. Viele andere Algenarten trugen in kleinerer Anzahl zu der Blüte bei.

Leider war die Fahrt zu kurz, um das Schicksal der Blüte ausreichend zu verfolgen. Eine empfindliche Methode, die natürliche radioaktive Isotope verwendet, um das Aussinken von Partikeln aus der Deckschicht in die Tiefe des Ozeans abzuschätzen, zeigte nur geringfügige Unterschiede zwischen den Verhältnissen innerhalb und außerhalb der gedüngten Fläche. Dies war keine Überraschung, denn wachsende Blüten sinken erfahrungsgemäß nicht. Erst am Ende der Blüte, wenn die Nährstoffe zu Ende gehen, verkleben Algenketten miteinander

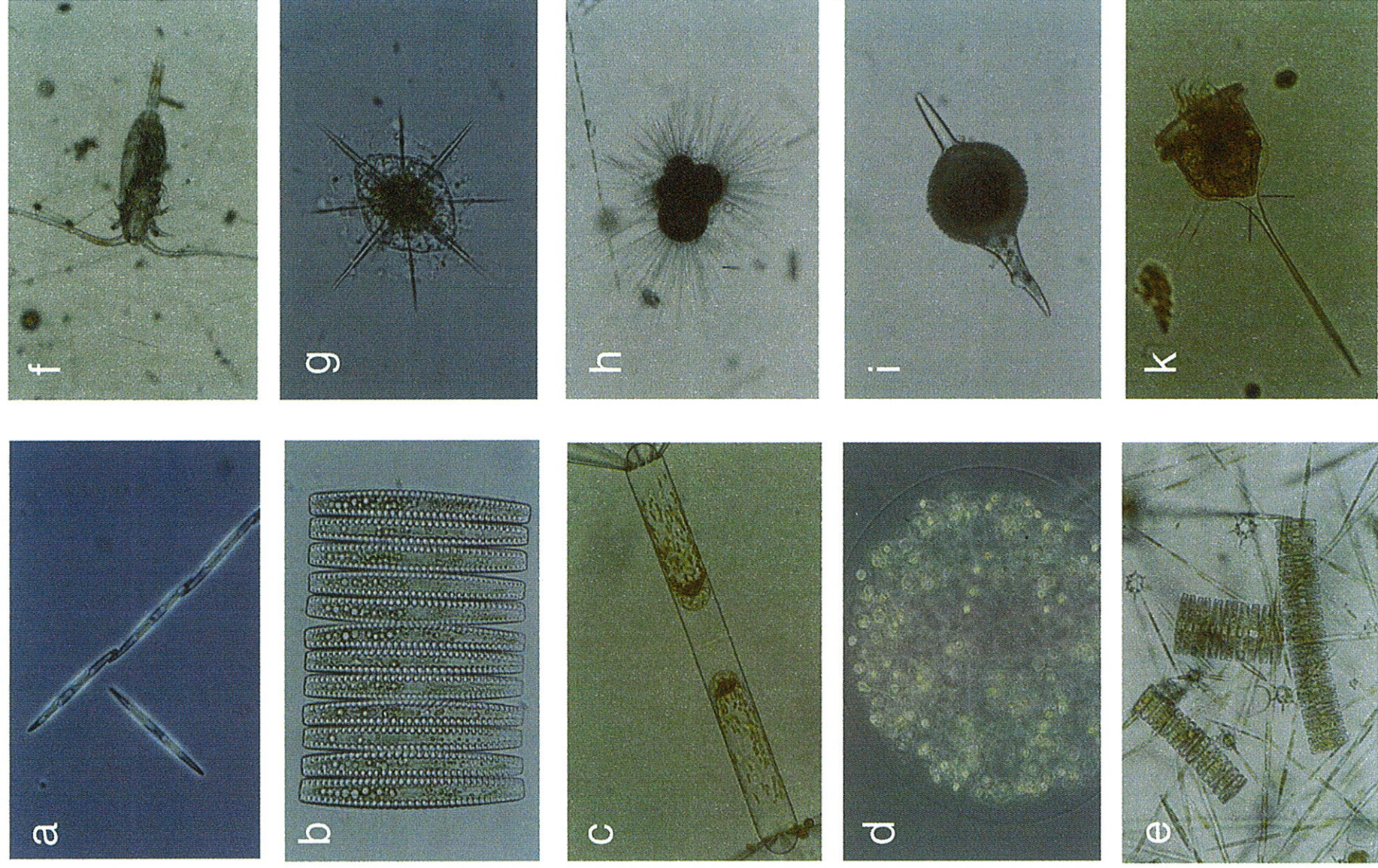


Abb. 6: Lichtmikroskopische Aufnahme der dominanten Phyto- (a-e) und Zooplanktonarten (f-k) im Düngungsgebiet:
 a-c: Kieselalgen; a: *Pseudonitzschia turgidula*; b: *Fragilariopsis kerguelensis*; c: *Corethron pennatum*; d: *Schaumalge*
Phaeocystis sp.; e: gemischte Probe, u.a. bestehend aus *F. kerguelensis*, *P. lineola*, *P. turgidula* und *Dictyocha speculum*;
 f: *Ruderfußkrebs* *Ctenocalanus citer*; g: *Acantharie* *Gigartacon muelleri*; h: *Kammerling* *Globigerina bulloides*;
 i: *Radiolarie* *Protocystis swirei*; k: *Tintinnide* *Cymatocyclis calyciformis* (Aufnahmen von P. Assmy, J. Henjes und
 U. Freier)

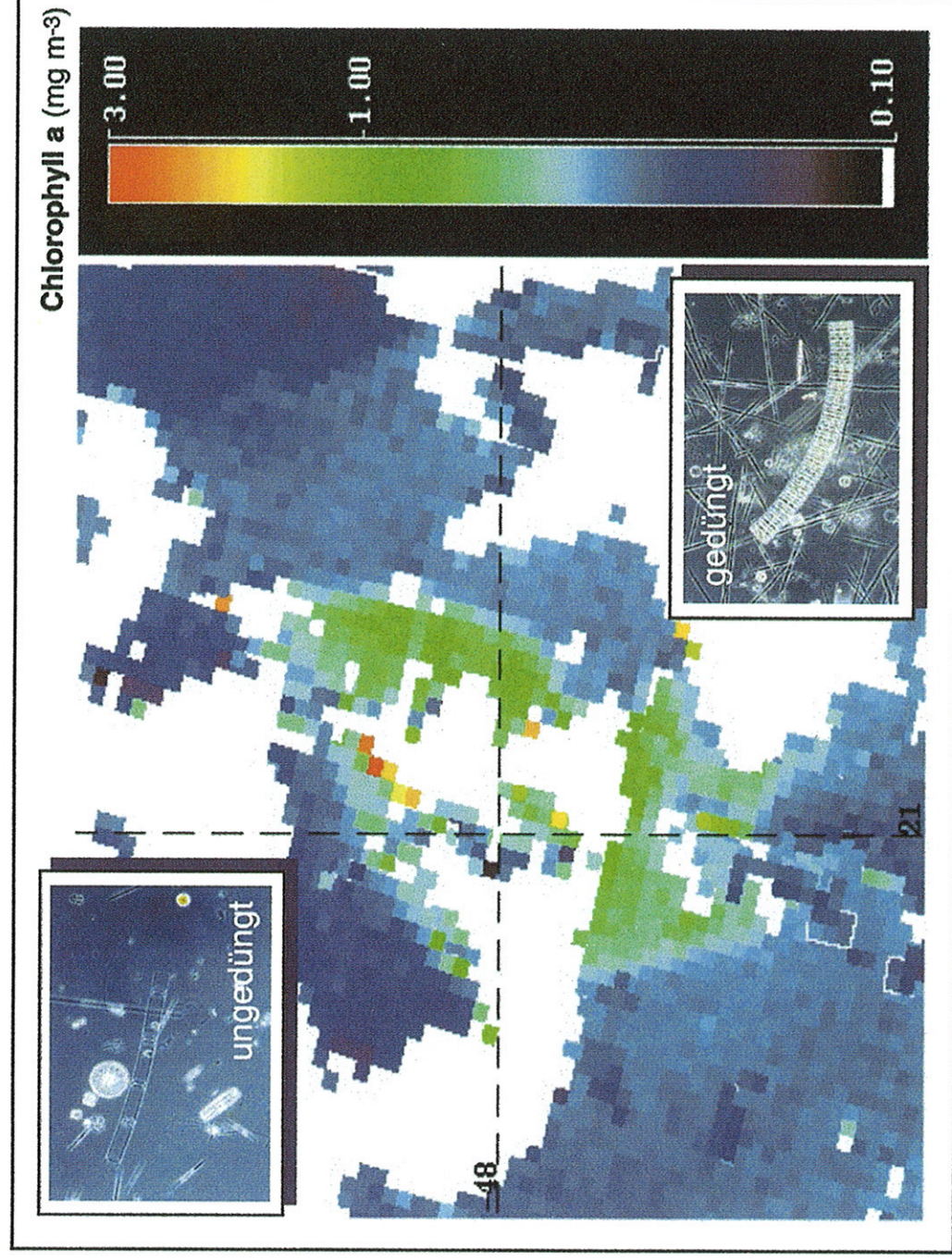


Abb. 7: Satellitenaufnahme der Chlorophyll-a-Konzentration im Untersuchungsgebiet 17–21 Tage nach der ersten Eisenzugabe (Aufnahme zusammengesetzt aus den Satellitenaufzeichnungen mehrerer Tage, weiße Flächen kennzeichnen Wolkenbedeckung). Der gedüngte Fleck, dessen Durchmesser sich mittlerweile auf 30 km ausgedehnt hat, hebt sich durch erhöhte Chlorophyllwerte deutlich vom Umgebungsgebiet ab. Mikrophotographische Aufnahmen zeigen die Planktongemeinschaften außerhalb (links oben) und innerhalb (rechts unten) des gedüngten Flecks (P. Assmy und A. Davidov)

und bilden Flocken, die wie Schnee herabsinken und große Tiefen und sogar den Boden in mehreren tausend Metern Tiefe erreichen können. Dieser Vorgang ist oft im Nordatlantik beobachtet worden.

Wir mussten unseren Wirbel verlassen, gerade als die Blüte sich noch kräftig entwickelte. Da Algen Eisenvorräte anlegen können, besteht kein Zweifel, dass noch viel mehr Algenbiomasse in den darauf folgenden Wochen aufgrund der Düngung aufgebaut wurde. Ob sie abgesunken ist, wissen wir nicht. Die neuseeländische Blüte, an der *Fragilariopsis* großen Anteil hatte, blieb, wie Satellitenaufnahmen zeigten, über einen Monat an der Oberfläche. Leider war unser Wirbel jedesmal durch Wolken bedeckt, wenn der Satellit, der die Ozeanfärbung misst, über den Fleck flog. Die Bilder, die wir an dünn bewölkten Tagen erhielten, zeigten Ausschnitte der Blüte, die durch die Wolken hindurch schimmerte (Abb. 7). Leider blieb die Wolkendecke auch in den Wochen und Monaten nach EisenEx meist geschlossen.

Obwohl die endgültige Größe und das Schicksal der gedüngten Blüte nicht bestimmt werden konnten, war EisenEx sehr erfolgreich. Wir konnten zeigen, dass das Planktonwachstum im Antarktischen Zirkumpolarstrom schon im Frühjahr durch Eisenmangel begrenzt ist und

dass die Zugabe dieses Elements zu einer Vervielfachung der Biomasse innerhalb von drei Wochen führen kann – trotz des hohen Fraßdrucks und der schlechten Lichtbedingungen, die für das Südjähjahr charakteristisch sind. Wir haben ferner vorgeführt, dass auch im sturmreichen und durch schnelle sowie wechselhafte Strömungen gekennzeichneten Zirkumpolarstrom ein Eisendüngungsexperiment möglich ist und die wachsende Blüte über einen längeren Zeitraum verfolgt werden kann.

Weitere Fragen

EisenEx hat uns vor Augen geführt, wie wenig wir eigentlich vom Leben im Ozean verstehen. So wissen wir nicht, warum die langen Nadeln der *Pseudo-nitzschia* am schnellsten heranwachsen, aber von den gepanzerten Ketten von *Fragilariopsis* und den stacheligen Zellen von *Corethron* mengenmäßig schließlich überholt wurden. Und was ist danach passiert? Hat es Kohlenstoff auf den Meeresboden geregnet oder nur leere Kieselalgenschalen mit wenig organischer Substanz? Und was geschah, als das gelöste Silizium – der Stoff, aus dem die Kieselalgen sind – ausging? Sind dann die Kalkalgen zum Zuge gekommen oder die Schaumalgen? Blüten beider

Algengruppen kommen regelmäßig in der Nordsee vor und auch am Rande der Antarktis. Kalkalgen haben aber eine gänzlich andere Wirkung auf den Kohlenstoffhaushalt als Kieselalgen. Paradoxerweise vermindert die Fällung von Kalk im Ozean dessen Fähigkeit, Kohlendioxid von der Atmosphäre aufzunehmen, denn für jedes Molekül Kalk, das gefällt wird, wird ein Molekül Kohlendioxid „freigesetzt“, welches über das Wasser in die Atmosphäre gelangt. Dort, wo die Kalkalgen blühen und es nur Kalkschalen regnet, wird der Ozean zur Kohlendioxidquelle. Damit wäre die Eisendüngung von Kalkalgen kontraproduktiv im Sinne der Senkung des CO₂-Gehalts der Atmosphäre. Die Wirkung der Schaumalgen auf die Kohlenstoffpumpe ist nicht geklärt. Absinkereignisse im Anschluss an Blüten sind beobachtet worden, aber in der Nordsee bleiben die Algenreste im Oberflächenwasser und werden gelegentlich von Wellen zu meterhohen, steifen Schaumstreifen (daher der Name) geschlagen, die dann im Frühsommer den Nordseestrand säumen.

Kalk- und Schaumalgen erzeugen erhebliche Mengen eines schwefelhaltigen Moleküls (DMSP), dessen Funktion in der Zelle noch nicht geklärt ist (s. Beitrag Kirst). Beim Absterben der Algen zerfällt DMSP in Dimethylsulfid (DMS), das als Gas in die Atmosphäre entweicht und dort zu wasseranziehender Schwefelsäure oxidiert wird. Es wird vermutet, dass diese als Kondensationskeime wirken und zur Bildung von Wolken mit sehr kleinen Tröpfchen führen. Die kleineren Tröpfchen schwefelreicher Wolken lassen diese heller erscheinen als „normale“ Wolken. So werden mehr Sonnenstrahlen in den Weltraum reflektiert, und die Erdoberfläche wird um einen entsprechenden Betrag kühler. Ob diese Algen unmittelbar klimawirksam sind, ist noch zu klären. Ihr Wirken auf geologischen Zeitskalen ist unumstritten: Ihre Blüten, die regelmäßig im Frühsommer im Nordatlantik und in der Nordsee auftreten, tragen erheblich zur Versauerung des Regens und somit zur Verwitterung vom Gestein bei. Im spätsommerlich gedüngten Fleck südlich von Neuseeland wurde sehr viel mehr DMSP gebildet als im EisenEx-Fleck. Wieviel DMS an die Atmosphäre abgegeben wurde, ist wegen der Kürze des Experiments ebenso wenig bekannt wie die spätere Artenzusammensetzung im algenreichen Fleck, der vier Wochen nach dem Experiment vom Satelliten gesichtet wurde. Hat die Algenvermehrung zu einer entsprechenden Vermehrung des algenfressenden Zooplankton geführt, und in welche Nahrungskette sind die Tierchen eingespeist worden? Im Südpolarmeer sind die häufigsten Fische die wenige Zentimeter großen, großäugigen, lichtscheuen Leuchtsardinen, die das Aussehen von grotesken Tiefseefischen haben, aber nachts nahe der Oberfläche Zooplankton fressen. Ist eine Vermehrung ihrer Bestände bei fortgesetzter Eisenzufuhr zu erwarten? Im sehr produktiven Arabischen Meer zum Beispiel sind derart hohe Dichten dieser Fische entdeckt worden, dass ihre Befischung erwogen wird. Andererseits: Wenn größere Mengen organischer Substanz herabgesunken sind, welche Organismengruppen haben in der Tiefe von diesem Leben spendenden Futterregen profitiert? Modellberechnungen zeigen, dass bei langfristiger Düngung der Sauerstoffgehalt in mittleren Wasserschichten des AZS stark abnehmen kann, was zu einer Änderung der Chemie des Wassers führt: Im sauerstofffreien Wasser ist Eisen leicht löslich. Dieser Zustand herrscht im

Arabischen Meer, das eine bedeutende Senke für CO₂ darstellt. War der Antarktische Wasserring in den Eiszeiten ähnlich dem heutigen Arabischen Meer, dessen Staubzufuhr auch heute aus den umgebenden Wüsten gesichert ist? Noch können wir nur Vermutungen anstellen. Der Ozean birgt noch viele Überraschungen, die durch Experimente wie EisenEx genauer studiert werden können. Bisher waren die Biologische und auch die Physikalische Ozeanographie eine beobachtende Wissenschaft, die aus Zustandsbeschreibungen die entscheidenden Prozesse ableitete. Mit der Umwandlung in eine experimentelle Wissenschaft bricht eine neue Ära in der Meeresforschung an: Endlich können Hypothesen getestet und Prognosen auf fundierter Basis erstellt werden.

Manipulation im Ozean

Eile ist geboten, denn einige Firmen in den USA entwickeln zur Zeit Pläne, um den Südozean mit Eisen großräumig zu düngen und damit zur Lösung des menschengemachten Treibhausproblems beizutragen. Der finanzielle Anreiz liegt in dem im Kyoto-Protokoll vorgesehenen Zertifikathandel für die CO₂-Entsorgung: Man rechnet mit etwa 2 US \$ pro Tonne entsorgtem CO₂. Da der AZS das Potenzial birgt, einige hundert Millionen Tonnen CO₂ aufzunehmen, ist es kein Wunder, dass sich diese Firmen weitläufige Patente zur Eisendüngung bereits gesichert haben. Dazu gehören treibende Kugeln, die über Monate hinweg nach und nach Eisen in das Oberflächenwasser abgeben. Zwar ruht das Kyoto-Protokoll, die Firmen rechnen aber damit, dass es in nicht allzu ferner Zeit in neuer Form wiederbelebt wird. Schließlich hat sich der Zertifikathandel in den achtziger Jahren bewährt, um die Schwefelemissionen der US-Industrie einzudämmen, die für die Versauerung der kanadischen Seen verantwortlich waren. Den Beweis für eine tatsächliche, von den USA zunächst abgestrittene Versauerung der Seen brachten damals die Kieselalgen: Kanadische Forscher zeigten an Hand der Seesedimente, dass die ursprüngliche Flora zeitgleich mit der Zunahme der Schwefelemissionen durch Säure liebende Arten abgelöst wurde.

Zur Zeit verdichten sich die Indizien, dass der Erwärmungstrend der letzten Jahrzehnte auf die CO₂-Zunahme in der Atmosphäre zurückzuführen ist. Wie oben schon erwähnt, waren die Kaltzeiten wesentlich trockener und staubiger als die Warmzeiten. So ist anzunehmen, dass eine weitere Erwärmung der Atmosphäre zu stärkerer Verdunstung über den Ozeanen und somit zu erhöhten Regenfällen auf den Kontinenten führen wird und – auf globaler Ebene – zu einer Zunahme der Pflanzendecke und damit zur weiteren Reduktion in der Staubzufuhr zum Ozean. Der Trend wird durch erfolgreiche Aufforstungsprogramme in Ländern wie Indien und China verstärkt. Die Verfechter der Eisendüngung weisen darauf hin, dass sich die eisenlimitierten Gebiete im Ozean ausdehnen werden, vermutlich zum Nachteil der Tierpopulationen bis hin zu den Walen.

Die Wissenschaftlergemeinschaft in den USA ist geteilter Meinung. Eine Fraktion hat sich in der Zeitschrift „Science“ vom 12. Okt. 2001 mit Nachdruck gegen den Zertifikathandel mit Eisendüngung ausgesprochen, während andere angesehene Wissenschaftler mit den Firmen zusammenarbeiten. Es ist klar, dass sich hier eine neue,

schwierige Problematik auftritt, die nicht nur wissenschaftliche, sondern auch rechtliche und nicht zuletzt ethische Fragen aufwirft. Denn wer entscheidet über eine Genehmigung zur Düngung des Südlichen Ozeans? Im gegenwärtigen Zeitgeist, der in Europa herrscht, erzeugt die Vorstellung einer großflächigen Manipulation der Ozeane spontanen Widerwillen. Setzt sich der Erwärmungstrend fort, ist mit einem Meinungsumschwung zu rechnen, spätestens dann, wenn sich die Proteststimmen in den am härtesten betroffenen Ländern des Subtropengürtels erheben.

Die Eisendüngungsproblematik muss dringend wissenschaftlich untersucht werden. Im Rahmen des neuen internationalen Programms SOLAS (Surface Ocean – Lower Atmosphere Study) werden z.Zt. Pläne entwickelt, um eine Serie von Eisendüngungsexperimenten mit mehreren Schiffen einschließlich FS „POLARSTERN“ durchzuführen. Die Experimente sollen in verschiedenen Wassermassen zu unterschiedlichen Jahreszeiten über längere Zeit erfolgen, um verlässliche Antworten auf die oben skizzierten grundsätzlichen Fragen zu erhalten. Das Alfred-Wegener-Institut nimmt eine führende Rolle bei dieser Planung ein.

System Erde

Eine Lehre hat die Forschung der letzten Jahre erbracht: Die Biosphäre des Planeten Erde funktioniert als zusammenhängendes System, das in der jüngsten erdgeschichtlichen Vergangenheit zwischen zwei unterschiedlichen Zuständen – Warm- und Eiszeiten – oszilliert hat. Dass wir auf dem besten Wege sind, uns aus diesem Kreislauf heraus zu bewegen, ist wahrscheinlich. Es ist damit zu rechnen, dass ein wärmerer Ozean weniger produktiv sein wird. Allerdings lässt unser Kenntnisstand viel zu wünschen übrig.

Die bisherigen Vorstellungen von simplen Nahrungsketten, die von Kieselalgenblüten über die Krebstierchen des Zooplanktons bis hin zu den Fischen und Walen führen, sind durch viele neue Entdeckungen der letzten Jahre revidiert worden. Das sich häufende Wissen lässt sich aber noch nicht zu einem kohärenten Bild der Wechselwirkungen im Plankton zusammenfügen. Pelagische Ökosysteme sind mit unseren Messmethoden leicht zu quantifizieren, aber die neuen Erkenntnisse zeigen, dass sie schwer zu verstehen sind.

Es fällt uns leichter, die Funktionsweise von terrestrischen Ökosystemen zu verstehen, weil sie für unsere Sinnenorgane unmittelbar wahrnehmbar sind. Andererseits sind sie wegen ihrer räumlichen Heterogenität schwer zu quantifizieren. Um das Plankton zu erfassen, sind wir dagegen auf Instrumente angewiesen, deren Ergebnisse gedeutet werden müssen. Die neuen Erkenntnisse zeigen, dass das Plankton grundsätzlich anders funktioniert und anderen evolutionären Trends gefolgt ist als die Landlebewesen. Langfristige Düngungsexperimente werden weitere Überraschungen mit sich bringen, die zur Entwicklung und Festigung einer neuen Vorstellung von der Funktionsweise pelagischer Systeme führen werden. Erst mit diesem Wissen als Grundlage können wir es wagen, an neue Formen der Nutzung der Ozeane zu denken. In diesem Punkt zumindest ist sich die Forschungsgemeinde einig.

Literatur

- Boyd, P. W. und 34 Ko-Autoren (2000), A mesoscale phytoplankton bloom in the polar Southern Ocean stimulated by iron fertilization. *Nature* 407, 695–702.
- Chisholm, S. W., Falkowski, P. G., Cullen, J. J. (2001), Dis-crediting ocean fertilization. *Science* 294, 509–510.
- Falkowski, P. G., Barber, R. T., Smetacek, V. (1998), Biogeochemical controls and feedbacks on ocean primary production. *Science* 281, 200–206.
- Falkowski, P. G., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Höglberg, P., Linder, S., Mackenzie, F. T., Moore III, B., Pedersen, T., Rosenthal, X., Seitzinger, S., Smetacek, V., Steffen, W. (2000), The Global Carbon Cycle: A test of our knowledge of earth as a system. *Science* 290: 291–296.
- Smetacek, V. (2001), A watery arms race. *Nature*, 411: 745.
- Watson, A. J., Bakker, D. C. E., Ridgwell, A. J., Boyd, P. W. & Law, C. S. (2000), Effect of iron supply on Southern Ocean CO₂ uptake and implications for global atmospheric CO₂. *Nature* 407, 750–755.