

Was für ein aufregendes, ergiebiges Experiment ist dies gewesen! Die Suche nach einem geeigneten Wirbel, die schwere Entscheidung den Wirbel zu wechseln, die Mühsal der Düngung, die Spannung und Geduld während der Suche nach dem Hotspot in dem rotierenden Fleck, die ermüdenden langen Stationen, das schaukelnde Schiff, das uns um den wohl verdienten Schlaf brachte, gekrönt schließlich von Genugtuung, als unsere „Ernte“ in die Tiefe verschwand. Wir haben alle bis zur Erschöpfung gearbeitet, unterstützt durch die Besatzung, die jeden Wunsch prompt erfüllte. Es hat alles geklappt und wir haben unseren Fleck verlassen ohne etwas zu bereuen. Wir hätten nicht mehr erreichen können und sind daher zufrieden. Was für ein großartiges Erlebnis!

EIFEX ist unseres Wissens das erste Experiment, welches das Schicksal einer eisengedüngten Blüte im Detail verfolgen konnte. Die Geschwindigkeit, mit der die Kieselalgenketten aus unserer Blüte durch die Wassersäule absanken, hat unsere Erwartung bei weitem übertroffen. Wir hatten unsere Aktivitäten auf die obere 500 bis 1000 m Schicht konzentriert und hatten insgesamt nur 5 CTD Einsätze bis zum Grund geplant, um die Tiefenstruktur des Wirbels zu erfassen. Aber letzte Woche ging die CTD mehrmals hinunter bis dicht über den Meeresboden in 3.800 m Tiefe, um in Profilen der Wassersäule die absinkenden Kieselalgenflocken zu verfolgen. Der letzte Einsatz war der bodennahen Schicht gewidmet, wo wir eine Zunahme der Trübung während der letzten Woche beobachtet hatten. In einer angereicherten Probe aus dieser Schicht kamen unter dem Mikroskop viele Ketten und Zellen aus unserer Blüte zum Vorschein. Wir wussten woher sie stammten, weil ihre filigrane Struktur und die spitzen Borsten im perfekten Zustand waren. Diese lösen sich relativ schnell auf, daher war das Material noch sehr frisch, vom Zooplankton unberührt. In der Tiefe waren auch die verschwundenen Ketten von Chaetoceros aus unserer Blüte, zusammen mit vielen Zellen von anderen schwach verkieselten Arten. Die meisten waren leer aber einige wiesen noch Zellinhalte auf, die allerdings zerfallen waren. Das Flusszytometer, ein Instrument das Zellen und ihre Eigenschaften unter einem Laserstrahl einzeln erfasst, entdeckte sogar fluoreszierende Zellen, d.h. einige enthielten noch Chlorophyll.

Zusammen mit den intakten Kieselalgenzellen fanden sich viele lose verklebte, zerkaute Kieselalgenschalen, die offensichtlich durch den Darm von Zooplankton gegangen waren. Die absinkenden Algenketten müssen sich mit diesem Material zu Flocken verheddert haben, die schnell durch die Wassersäule absanken. Vor diesem Ereignis hatten die Thoriummessungen, die eine Abschätzung der Partikelverluste aus den entsprechenden Schichten liefern, keinen nennenswerten Export von Partikeln aus der Deckschicht angezeigt. So wurde das anfallende Kotmaterial vom Zooplankton Fraß zurückgehalten. Als das Massenabsinken der Kieselalgen aber anfang, sank ein Teil dieses Materials mit den Flocken ab. Obwohl der Partikelregen zumeist aus leeren Siliziumschalen bestand, wurde auch organische Materie und dadurch Kohlenstoff in die Tiefe verfrachtet. Mengenangaben können wir noch nicht

liefern.

Die letzte Station außerhalb des Flecks zeigte, dass derselbe Prozess, den wir in unserer Blüte verfolgt hatten, sich auch hier abgespielt hat, allerdings in viel geringerem Ausmaß. Die Chaetoceros Arten, die die Blüte dominiert hatten, waren ebenfalls weg und dieselben Arten wie in unserer Blüte blieben auch hier zurück. Im Transmissometerprofil waren auch Zacken zu sehen, aber wesentlich weniger als in der Wassersäule unter unserer Blüte. Also hat das Massenabsterben von Chaetoceros und anderen Arten auch hier stattgefunden. Weil es aber in der Blüte mehr Biomasse gab, war der Partikelregen entsprechend stärker. Obwohl die Gründe für das Massenabsterben noch nicht bekannt sind, war das Phänomen ein Teil des Artenwechsels, der für pelagische Ökosysteme von Seen bis zum offenen Ozean typisch ist. Dieser saisonale Artenwechsel ist seit 150 Jahren bekannt, aber die treibenden Kräfte und die evolutionäre Vorteile für die jeweiligen Arten sind noch nicht hinreichend erklärt. Nur interdisziplinäre Experimente wie das unsrige werden neuen Einblick in dieses alte Problem gewähren, weil die Erklärung sich nur aus dem Gesamtzusammenhang der beteiligten Prozesse ergeben wird. Dabei geht es um das Zusammenspiel zwischen den Wachstumsbedingungen (Licht, Nährstoffe, Eisen), die die Vermehrungsraten bestimmen, sowie das Wirken der Feinde (Pathogene, Parasiten und Fressfeinde), die über Mortalitätsraten der verschiedenen Arten entscheiden.

Ein anderer Faktor, der zum Ausfall von leeren Kieselalgeschalen führt, ist Sex. Bei jeder Zellteilung entsteht eine kleinere Tochterzelle. Ab einer bestimmten Größe wird eine sexuelle Phase induziert, um die ursprüngliche Größe wieder zu erreichen. Dabei wird der Zellinhalt in Gameten (entweder viele Spermien oder eine Eizelle) umgewandelt und die leeren Halbschalen werden abgeworfen. Die befruchtete Eizelle schwillt dann bis zur maximalen Größe heran und baut sich anschließend eine neue, große Schale. Die markante Corethron, deren 2 Kronen aus langen Stacheln wie die Speichen eines Regenschirms um die Zelle gespannt sind, ist eine besonders sexy Art, weil ihre Größenabnahme im Zuge der Teilung besonders ausgeprägt ist. Wir fanden viele halbe, leere Schalen dieser Art in der bodennahen Schicht, die Zeugen eines Massensexereignisses in der Deckschicht waren. Diese Schalen hatten nur Silizium in die Tiefe verfrachtet. Der Tod der anderen Arten war aber sicher nicht Folge eines sexuellen Ereignisses.

Nach dem Verschwinden der Chaetoceros-Zellen blieben die langen, schmalen aber zähen Zellen (2 mm lang, 0.006 mm breit) von *Thalassiothrix antarctica* („antarktisches Seehaar“) zurück. Die Massen von stacheligen Kieselalgen, die die Zooplanktonnetze verstopften, waren lästig, weil es schwierig war, heile Copepoden für Experimente aus ihnen zu entnehmen. Aber die mit Widerhaken besetzten, faserigen Zellen von *Thalassiothrix* verweben sich zu Glaswollmatten, die das Sortieren von Zooplanktonproben zum Albtraum machen. Die Festigkeit der Matten spiegelt auch deren Widerstandskraft gegen Fressfeinde wider, so werden Copepoden solche Zellen nicht bevorzugen und stattdessen, kleinere weniger stark gepanzerte Arten beweidet. Zu den

letzteren gehören auch die schnellwüchsigen, kleinen Chaetoceros-Arten, von denen wir einen größeren Anteil an der Blüte erwartet hatten. Ihre Zahl ging aber in der zweiten Hälfte des Experiments zurück, vermutlich wegen des erhöhten Fraßdrucks der Copepoden, deren Anzahl während der Blüte zunahm.

Andere häufige Arten, die im Fleck sowie außerhalb weiter wuchsen waren Pseudo-nitzschia Arten und Fragilariopsis kerguelensis (Fkerg). Die nadelförmigen Ketten der ersten Gattung ähneln Thalassiothrix Zellen und sind wohl auch gegen Fraß geschützt. Die Zellen von Fkerg sehen aus wie kleine Boote, deren Wände mit dicken Rippen verstärkt und daher schwer zu knacken sind. Zusammen mit Thalassiothrix bildet Fkerg etwa 90% des kieseligen Sediments unter dem ACC. Dieser Gürtel ist die größte zusammenhängende Senke für Silizium im Weltozean. Weshalb so viele Kieselschalen unter diesem eisenlimitierten Gewässer abgelagert werden, war bisher ein Rätsel. Unsere Beobachtung der Prozesse in der Blüte bestätigt nun die Vermutung, dass die großen, stark gepanzerten Arten deshalb akkumulieren, weil die zarten, schnellwüchsigen Arten durch Copepoden schneller weggefressen werden. Die großen Arten enthalten bis zu sechsmal mehr Silizium pro Kohlenstoff als die kleinen, weshalb es nicht verwunderlich ist, dass die Sedimente aus deren Schalen bestehen. Im Endeffekt ist der selektive Wegfraß durch Copepoden der Grund für die starke Ablagerung von Silizium in dieser Gegend.

Die großräumigen akustischen Aufnahmen zeigten, dass die Copepodenbestände innerhalb des Flecks gegenüber dem umliegenden Wasser zugenommen hatten. Weil diese Tiere unter den niedrigen Temperaturen langsam wachsen, wird die Zunahme durch Einwanderung von außen erklärt, bewerkstelligt durch Veränderungen im täglichen vertikalen Wanderverhalten. Treffen die Tiere auf ein reiches Nahrungsangebot, wandern sie weniger tief. Tiefere Schichten bewegen sich langsamer als die Deckschicht. Tiere, die in der Nähe der Deckschicht tagsüber verbleiben, werden eher im Bereich der nahrungsreichen Deckschicht zurückgehalten. Dieses Verhalten ist schon früher vermutet worden, unsere Ergebnisse aber belegen, dass es tatsächlich stattfindet. Ein weiterer wichtiger Befund betrifft die Salpen, die als Nahrungskonkurrenten für Krill und Copepoden, die Grundlagen der Nahrungsketten aller pelagischen Fischereien von Sardinen bis Heringen, Thunfischen bis Walen, betrachtet werden. Vor der Düngung und im umgebenden Wasser kamen während der gesamten Zeit Salpen sehr häufig in den Netzfängen vor. Aber im Verlauf der Blüte ging deren Zahl zurück und am Ende waren kaum noch welche innerhalb der Blüte zu finden. Wir glauben, dass die wässrigen Tiere von den dichten Massen stacheliger Diatomeen abgehalten wurden. Somit gedeihen Salpen in Blüten nicht und können keine Konkurrenten für Krill sein, weil Krill die großen Diatomeen gut bewältigt. Mit anderen Worten, Salpen sind an die niedrigen Planktonkonzentrationen im eisenlimitierten Wasser angepasst. Berichte über ihre Zunahme im Bereich des Kontinents deuten daher auf eine Verringerung der Produktivität in den betreffenden Gebieten hin.

Es ist sehr wahrscheinlich, dass unsere Blüte das Wachstum der Copepoden und der hiesigen Krillarten gefördert hat, aber wir wissen nicht welche Carnivore von dieser Nahrungsressource profitiert haben. Es gibt wenig Fische im ACC und das große Schleppnetz, das wir in den windärmeren Perri-o--den durch den Fleck und außerhalb gezogen haben, hat vor allem Krill-larten, Chaetognathen (Pfeilwürmer) und Amphipoden gefangen. Abgesehen von den vereinzelt Walen, Robben und Pinguinen, waren die vielen Vögel die einzigen großen Räuber im Gebiet. Diese waren teilweise sehr häufig und die riesigen Wanderalbatrosse sehr imposant, aber, obwohl sie sich hauptsächlich von Zooplankton ernähren, werden die Vögel wohl nur einen kleinen Anteil der Bestände vertilgt haben. Blüten von der Größe, die wir erzeugt haben, bilden die Nahrungsgrundlage des reichen Tierlebens in den Küstenge-wässern der Antarktis. Da Eisendüngung das gesamte Plankton (abgesehen von den Salpen) deutlich stimuliert hat, wäre es den Versuch wert, die Produktivität in diesen Gegenden gezielt zu erhöhen oder gar die produktiv-en Gebiete auszudehnen, um mehr Nahrung für bedrohte Tierbestände zu schaffen.

Das übergeordnete Ziel dieser interdisziplinären Fahrt war das Schicksal der künstlich erzeugten Blüte messend zu verfolgen: Wird die aufgebaute organische Substanz von Bakterien und Zooplankton gleich in der Oberflächenschicht wieder abgebaut und in CO<sub>2</sub> zurückgeführt, oder sinkt ein wesentlicher Teil ab und transportiert damit Kohlenstoff aus der Atmosphäre in die Tiefsee? Die meisten Experimente vor EIFEX, einschließlich EisenEx waren zu kurz, um das Schicksal der Blüte zu verfolgen. So hatten wir Glück, weil wir die Abbauphase der Blüte untersuchen konnten. Die obige Frage hat 2 zeitliche Dimensionen. Auf der einen Seite handelt es sich um Zeitskalen von vielen Tausenden von Jahren, während das Klima der Erde zyklische Veränderungen zwischen Warm- und Eiszeiten durchlebt hat. Auf der anderen Seite handelt es sich um die gegenwärtige Bedrohung durch die globale Erwärmung in Zeitskalen von wenigen Dekaden. Messungen an Eiskernen aus der Antarktis und Grönland haben gezeigt, dass der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre und die Temperatur eng aneinander gekoppelt sind, wobei die Ursache-Wirkungskette noch unbekannt ist. Die niedrigsten Werte in den Eiszeiten lagen bei 180 ppm (0,018%) und stiegen auf 280 ppm in den Warmzeiten. Dieser Wert war bis vor 150 Jahren stabil, aber heute sind die Werte wegen der Verbrennung von Öl, Gas und Kohle auf 370 ppm gestiegen mit einer Rate von 1,5 ppm pro Jahr. Aber welche sind die Quellen und Senken das CO<sub>2</sub> zwischen den Warm- und Eiszeiten?

Die Menge an Kohlenstoff in der heutigen Vegetation entspricht ungefähr der Menge, die in der Atmosphäre vorhanden ist, aber die Wälder während der Eiszeiten waren, weil es kühler und daher trockener war, wesentlich begrenzter (einschließlich die Regenwälder) als in den Warmzeiten. In Wirklichkeit verschwindet also noch mehr Kohlenstoff in den Eiszeiten, nämlich der Teil der vom Rückgang der Vegetation stammt. Weil der Ozean fünfzigmal so viel CO<sub>2</sub> wie die Atmosphäre enthält, liegt die Annahme nah, dass hier auch die Quelle und Senke des fehlenden CO<sub>2</sub> zu suchen sind. Dem ACC kommt eine besondere Rolle in diesem Zusammenhang zu, weil hier wegen der

Eisen-limitation enorme Mengen unverbrauchter Nährstoffe vorkommen. Wäre der gesamte Nitratgehalt des Oberflächenwassers auf einmal durch Plankton verbraucht, fiel der CO<sub>2</sub>-Gehalt um ca. 2 ppm. Über Zeiträume von Hunderten von Jahren könnten etwa 50 ppm in die Tiefsee befördert werden. John Martin, der zuerst den Nachweis für Eisenlimitation des Planktons erbracht hat, schlug in seiner „Eisenhypothese“ vor, dass zunehmender Staubausfall über den ACC, dokumentiert in Eiskernen, die dortige Produktivität erhöht haben muss. Etwa 10% des Staubs ist Eisen. So argumentierte Martin, dass ein Teil des Kohlenstoffs, der vom eisgedüngten Plankton aufgenommen wurde, in die Tiefsee gelagert wurde. Geochemiker stellen die Hypothese in Frage, weil bisher noch keine klaren Beweise für eine erhöhte Produktion aus den Sedimenten, die in den Eiszeiten abgelagert wurden, erbracht worden sind. Entsprechend wird die Frage nach der Produktivität der eiszeitlichen ACC heute heiß diskutiert. Die Ergebnisse unseres Experiments unterstützen nun die „Eisenhypothese“, weil sie zeigen, dass ozeanische Blüten doch Kohlenstoff exportieren. Dieser Befund wird nun dazu beitragen einen Teil des Rätsels über den Verbleib des Kohlenstoffs während der Klimazyklen zu lösen.

Der zweite Aspekt unseres Experiments, der breite Medienaufmerksamkeit bekommen hat, dreht sich um die Frage, ob Eisendüngung einen beträchtlichen Teil des von Menschen freigesetzten CO<sub>2</sub> entfernen kann, um das Klima zu schützen. In anderen Worten, kann ein Prozess, der über Jahrtausende gewirkt hat, derart beschleunigt werden, dass dieselbe Wirkung in wenigen Jahren erzielt wird? Die Antwort ist nein, weil die Menge, die entfernt werden könnte, lediglich 10% des jährlich von Menschen freigesetzten CO<sub>2</sub> beträgt. Es wäre sinnvoller die Freisetzung zu drosseln, als einen regulierenden Mechanismus der Natur zu beschleunigen. Unser Experiment hat gezeigt, dass eisgedüngte Blüten sich ähnlich verhalten wie natürliche Blüten, d.h. sie haben dieselbe Artenzusammensetzung und sinken nach einer Weile rasch ab zusammen mit etwas Kohlenstoff.

Das CO<sub>2</sub>-Defizit im Hotspot des Flecks betrug etwa 15 gC/m<sup>2</sup> in der 100 m Wassersäule am Ende des Experiments. Ein äquivalenter Teil des Nitrats wurde auch aufgenommen, aber die riesigen Diatomeen nahmen viel mehr Silizium auf als ihre küstennahen Vettern. Die gesamte Primärproduktion der Algen betrug etwa das Doppelte des CO<sub>2</sub>-Defizits. Die Veratmung organischer Substanz durch Bakterien entsprach etwa der Hälfte der Algenproduktion. So passen diese vorläufigen Zahlen gut zueinander. Bakterienwachstum nahm während des Massenabsterbens der Algen sogar ab, ein Hinweis, dass nur ein Teil des freigesetzten organischen Materials abgebaut wurde. Detaillierte Bilanzen der Kohlenstoffmengen, die produziert, gefressen, abgebaut und in die Tiefe exportiert wurden, werden erstellt, nachdem die Proben bearbeitet worden sind.

Dieses Schiff von terrestrischen Aliens hat viele interessante Aspekte des Lebens in den riesigen Flächen dieses entfernten Ozeans zu Tage gefördert. Einige Vermutungen bezüglich der Interaktionen innerhalb des Ökosystems, die für planetarische Stoffkreisläufe relevant sind, wurden bestätigt.

Diese interdisziplinäre Fahrt von Physikern, Chemikern und Biologen hat mit dem Experiment eine reiche Ernte eingebracht. Polarstern ist nun auf dem Weg nach Kapstadt. Die Temperatur steigt stetig, der Wind hat nachgelassen und die See ist ruhig. Wir sind der Besatzung außerordentlich dankbar, dass sie den aufgezwungenen Aufenthalt in einer der gewalttätigsten Ozeane dieser Welt gutmütig ertragen hat, nur weil wir dort ein Experiment durch--führen wollten. Trotz des erschwerten Arbeitens auf einem stets schaukel--nden Schiff waren sie immer freundlich und gaben sich die größte Mühe, uns bei jeder Witterung zu helfen. Wir sind ihnen zutiefst dankbar.

Herzliche Grüße von einem Schiff, dessen Bewohner sich darauf freuen, wieder festen Boden unter die Füße zu bekommen, und die Anblicke, Geräusche und Gerüche des Landes wieder zu genießen.  
Victor Smetacek