

FS "Polarstern" verließ Kapstadt am 21. 01. pünktlich um 20.00 mit 96 Personen an Bord, von denen 43 zur regulären Besatzung gehören und 53 für die Durchführung des wissenschaftlichen Vorhabens verantwortlich sind. Letztere repräsentieren 14 Institute und 3 Firmen aus 7 europäischen Ländern sowie Südafrika. Es war ein heißer Tag und wir fuhren einem farbenprächtigen Sonnenuntergang entgegen. Alles war planmäßig abgelaufen und sogar das Wetter hätte nicht besser sein können, so waren wir alle in bester Stimmung. Die ersten Tage verbrachten wir mit dem Auspacken der unzähligen Kisten und dem Aufbau von diversen Instrumenten. Hier verlief auch alles wie am Schnürchen, dank der effizienten Vorarbeit der Logistiker am AWI sowie der tatkräftigen Hilfe der Besatzung an Bord.

Das Ziel unserer Fahrt - das Europäische Eisendüngungsexperiment (European Iron Fertilisation Experiment EIFEX) - ist die Untersuchung des Auf- und Abbaus einer Phytoplanktonblüte, die wir in einem Fleck von mehreren hundert Kilometern durch die Düngung mit ca. 20 Tonnen Eisensulfatpulver erzeugen werden. Unser Experiment ist das Achte einer Serie, die bislang in verschiedenen Meeresgebieten - jeweils zwei im Äquatorialen bzw. Subarktischen Pazifik sowie drei im Südlichen Ozean - durchgeführt worden sind. Phytoplanktonblüten wurden in allen Experimenten erzeugt, so sind wir zuversichtlich, dass uns dies wieder gelingen wird. Im Gegensatz zu diesen Experimenten (einschließlich das von uns vor drei Jahren durchgeführte EisenEx) haben wir diesmal neun Wochen Zeit, um auch das Schicksal der Blüte adäquat zu verfolgen.

Wir beabsichtigen das Experiment in einem Wirbel südlich der Antarktischen Polar Front, die bei ca. 50°S liegt, durchzuführen, weil die Silikatkonzentrationen nördlich der Front zu dieser Jahreszeit verbraucht sein werden. Unsere erste Aufgabe ist es, einen Wirbel ausfindig zu machen und dessen Eignung mit Messungen vor Ort zu überprüfen. Satellitenaufnahmen der Meeresoberfläche erlauben das Vorkommen und die Eigenschaften von Wirbeln zu erkennen, und so haben wir die Wirbelfelder südlich von Afrika seit Dezember studiert. Von mehreren geeigneten Wirbeln haben wir den Nahelegendsten bei 51°S ausgewählt und dampfen nun auf geradem südlichem Kurs dorthin.

Um einen Überblick über das hydrographische Feld und die Lage der Fronten zu gewinnen, begannen wir mit Messungen bei der Subantarktischen Front, die wir bei 46°S am frühen Morgen des 24. 01. antrafen. Die Station fing mit einem Multinetz an, dessen Zooplanktonfang wir zur Kalibrierung unserer akustischen Instrumente benötigen. Diese messen das Vorkommen dieser kleinen Tierchen kontinuierlich unter dem Schiff. Danach wurde mit der Mikrostruktursonde die Feinschichtung in der Wassersäule aufgenommen, gefolgt vom Einsatz des Hauptgeräts dieser Fahrt, der CTD-Rosette. Mit diesem Gerät werden Profile des Salzgehalts, der Temperatur, der Chlorophyllfluoreszenz sowie der Trübung gemessen. Mit seinen 24 jeweils 12 Liter fassenden Schöpfnern werden Wasserproben in vorbestimmten Tiefen genommen,

die von verschiedenen Chemikern und Biologen für ihre jeweiligen Zwecke genutzt werden. Die Daten der CTD benötigten wir zur Kalibrierung des Geräts Scanfish, das im Anschluss an der Station zu Wasser gelassen und hinter dem Schiff geschleppt wurde. Scanfish steigt und sinkt zwischen Oberfläche und 220m alle paar Kilometer und liefert mit seinen eingebauten Sonden die großräumige Struktur der durchquerten Wasserkörper.

Unglücklicherweise brach nach einem Tag erfolgreichen Schleppens durch ruhiges Wasser unvermittelt der Schleppdraht. Im unbeschwerten Zustand treibt der 2 m lange, grellgelbe Scanfish an der Oberfläche, und so suchten wir die Gegend mit dem Hubschrauber ab, leider ohne Erfolg. Das Gewicht des 150m langen Drahts, der noch am Gerät hing, hat es wohl in die Tiefe gerissen. Wir setzten die Vermessung des Schnitts mit kurzen CTD-Einsätzen alle 5 Meilen fort. Wir werden unseren Wirbel am Montag erreichen und Mitte der Woche entweder mit der Düngung anfangen oder zum nächsten Wirbel dampfen. Düngungsexperimente haben die Aufmerksamkeit der Medien wegen ihrer Relevanz für den Klimaschutz erregt. Auf diesen Aspekt werden wir in den kommenden Berichten näher eingehen. Das übergeordnete Ziel dieser Fahrt ist, unser Verständnis über das Funktionieren von ozeanischen Ökosystemen zu fördern und die vielfältigen Wechselwirkungen zwischen den Organismen und ihrer Umwelt zu erfassen, welche die großräumigen Stoffkreisläufe unseres Planeten bestimmen.

Die Art des Wissens, die wir gewinnen werden, kann am Besten mit einer science fiction Geschichte vermittelt werden. Man stelle sich intelligente Wesen vor, die auf einem Planeten ähnlich der Erde entstanden sind, der allerdings vollständig mit Wasser bedeckt ist, so wie Mars ausschließlich aus Land besteht. Hundert dieser Aliens besuchen nun die Erde (vor der Übernahme des Planeten durch Menschen) mit derselben Aufgabe (und Finanzierung) wie Präsident Bush für seine avisierte bemannte Marsmission vorschwebt. Da sie aquatische Wesen sind, "landen" diese Aliens auf dem Ozean in einem wassergefüllten Raumschiff und finden eine ihnen vertraute Umgebung vor, die von Organismen bewohnt ist, deren Funktionsweise und Evolution sie verstehen können. Die Luft atmenden Reptilien und Säugetiere (Schildkröten und Wale) werfen zwar Rätsel auf, aber die Lebensverhältnisse an Land werden sie völlig verblüffen.

Nehmen wir an, sie beschließen Afrika zum Ziel ihrer Studien zu machen. Da sie Propeller aber nicht das Rad erfunden haben, ziehen sie ihre Erkundung des Kontinents mit mitgebrachten wassergefüllten Hubschraubern durch. Sie werden sich zunächst über die Muster von Wäldern, Savannen, Halbwüsten und Wüsten wundern, aber nach Analyse ihrer Bilder und Proben werden sie die für sie seltsame Hypothese formulieren, dass die Vegetationsdecke von der Verfügbarkeit von Wasser abhängt, das von den Ozeanen verdunstet und als Regen auf die Kontinente niederfällt. Wie werden sie diese Hypothese beweisen? Natürlich durch Bewässerungsexperimente. Sie werden keinen Effekt in den Regenwäldern, wo es ohnehin jeden Tag regnet, erzielen. Aber auch die Sandwüsten werden kaum reagieren, da es dort an Erde und somit Nährstoffen mangelt. Aber die Flächen dazwischen, vor allem die, die sich

in der Trockenzeit befinden, werden binnen weniger Tage von einem grünen Hauch überzogen und in wenigen Wochen werden die Bäume grün und das Gras ordentlich gewachsen sein. Während dieser Zeit werden Herden von Wei---de-----tieren (Elefanten und Antilopen) angelockt und Insektenschwärme (von Blattläusen bis Wanderheuschrecken) herangewachsen sein, die über das üppige Grünzeug herfallen und es niederfressen. Zwischen den Tierbiologen und den Nährstoffchemikern werden heftige Diskussionen über die Bedeutung der Tiere bzw. Nährstoffe entbrennen, aber einig werden sie darüber sein, dass die Menge an Wasser letztendlich entscheidet, wieviel Leben auf dem Land erzeugt werden kann.

Kehren wir zu unserer Fahrt zurück. Ja, wir gehören zu den terrestrischen Aliens, die die seltsame Hypothese aufgestellt haben, dass eisenhaltiger Staub von den Kontinenten in den landfernen Ozean verweht, über Pro-duk-----tiv-i-tät entscheidet. Dort wo mehr "Eisenregen" fällt, wächst mehr Plankton und umgekehrt. Unser Experiment wird uns zeigen, wie das anämische Plankton auf die Eisenzugabe reagiert und was mit der produzierten Biomasse geschieht. Die Teams an Bord, welche die verschiedenen Aspekte des er-----warteten Geschehens bearbeiten, werden in den kommenden Berichten vorgestellt.

Polarstern ist unser sicheres Raumschiff und wir sind sehr glücklich darü---ber, dass viele Besatzungsmitglieder, die unseren Aufenthalt an Bord während EisenEx so angenehm gestalteten, wieder anwesend sind. Alle bemühen sich rührend um uns. Das Essen ist hervorragend und schmeckt umso besser, weil das Wetter bisher so ruhig geblieben ist. Stürme sind noch nicht in Sicht. Wir sind viel lieber hier als auf dem Mars.

Mit herzlichen Grüßen,

Victor Smetacek

Bildschirme stehen in allen Labors und Versammlungsplätzen auf diesem großartigen Schiff, die die Position, Geschwindigkeit sowie eine Anzahl anderer Daten kontinuierlich registrieren. In einem gesonderten Kasten steht die Nummer der Station, die gerade läuft oder als Nächste vorgesehen ist. Eine "Station" nennt man jede Stelle, wo das Schiff stoppt um Messungen durchzuführen oder Proben zu nehmen. Auf "normalen" Forschungsfahrten fährt das Schiff gerade Linien zwischen Stationen, deren Positionen vorher bestimmt werden. Aber nachdem wir unseren ersten Nord-Süd CTD-Schnitt, der kein Zeichen für einen Wirbel aufwies, beendet hatten, wussten wir nicht, wo die nächste Station sein würde. So stand "Search for the eddy" im Stationskasten während der ersten Hälfte der vergangenen Woche, vom Kapitän eingetragen. Wir wussten, dass wir zu einem Wirbel wollten, aber wir wussten nicht, wo er war. Wir suchten einen im Uhrzeigersinn drehenden Wirbel von etwa 100 km Durchmesser mit Sonar, dem Sinnesorgan der Fledermäuse und Delphine.

Polarsterns Sinnesorgan ist das Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), das hochfrequente Schallsignale von sich gibt, die von winzigen, in den Wasserschichten unter dem Schiff treibenden Planktonpartikeln reflektiert werden. Das ADCP analysiert diese Echos und berechnet die Strömungsgeschwindigkeit der verschiedenen Schichten, in denen sich diese Partikel befinden. Die akustische Information wird in Pfeilen dargestellt, die in die Richtung der Strömung an der jeweiligen Stelle zeigen. Ihre Länge gibt die Geschwindigkeit an. Für jeden Schnitt werden die Daten für 50 m dicke Schichten zwischen Oberfläche und 300 m Tiefe gemittelt. Der Vergleich zeigt, wie tief die Strömung reicht. Sollten wir einen Wirbel schneiden, würden die ADCP Ausdrücke Bündel von Pfeilen gleicher Länge aber entgegengesetzten Richtungen zeigen, entweder dicht zusammen oder weiter auseinander, je nachdem, ob der Rand gestreift, oder die Mitte getroffen wurde. Im letzteren Fall würden kleinere Pfeile das ruhigere Wasser in der Mitte anzeigen.

Unsere Suche wurde mit Satellitenbildern der Höhenunterschiede der Meeresoberfläche unterstützt, die von Altimetern ermittelt wird. Die Aufnahmen zeigen die Verteilung von Höhenunterschieden von einigen Dezimetern über Flächen von mehreren 10-Kilometern. Wirbel, deren Kern aus kaltem Wasser besteht, sind 20-40 cm tiefer in der Mitte als am Rand, weil kälteres Wasser weniger Volumen einnimmt als das umkreisende wärmere Wasser. Je dichter (kälter) der Wirbelkern relativ zur Umgebung, desto tiefer die Senke in der Mitte. Ein Wirbelkern aus leichterem (wärmerem) Wasser dagegen erhebt sich in der Mitte. Wirbel entstehen wenn Streifen hoher Stromgeschwindigkeiten - in der Regel Fronten zwischen 2 Wassermassen - mäandrieren und Schleifen bilden, die sich von der Strömung abschnüren und verselbständigen. Die so entstandenen Wirbel drehen eine Weile, verlangsamen allmählich und lösen sich im Umgebungswasser auf.

Weshalb wir einen im Uhrzeigersinn drehenden Wirbel für das Experiment

benötigen, bedarf zunächst einer Erklärung der besonderen Verhältnisse im Antarktischen Zirkumpolarstrom (AZS). Dieser ca. 1000 km breite Ring kalten Wassers umkreist den Kontinent und schirmt die daraufliegenden Eismassen vom übrigen Ozean ab. Der AZS wird vom Westwindgürtel in östliche Richtung geschoben und lässt sich anhand der Temperatur in mehrere Gürtel unterteilen, die jeweils durch Fronten - scharfen Temperaturgradienten - voneinander getrennt sind. Die Polarfront ist der markanteste Übergang und unterteilt den AZS in zwei Ringe: die Polarfrontzone (PFZ) im Norden und die Antarktische Zone (AZ) im Süden. Die Fronten im AZS mäandrieren nach Norden oder Süden und können Wirbel auf beiden Seiten abschnüren. Über diesen Weg werden Wassermassen vom einen in den anderen Gürtel transportiert und eingemischt. Das Oberflächenwasser des AZS ist sehr reich an Nährstoffen, weil es ständig Nachschub durch auftreibendes Tiefenwasser, vor allem entlang der südlichen Grenze, bekommt. Während Nitrat- und Phosphatkonzentrationen über den ganzen AZS stets hoch sind, nimmt der Silikatgehalt vom Süden nach Norden stark ab. Zu dieser Jahreszeit sind die Silikatkonzentrationen nördlich der Polarfront sehr niedrig, wegen der verstärkten Aufnahme dieses Nährstoffs durch Kieselalgen. Weil unsere Blüte von eben diesen Kieselalgen gebildet wird, sollten wir tunlichst unser Experiment in silikatreichem Wasser, das südlich der Polarfront entstammt, durchführen. Ein solcher Wirbel, der aus südlichem Wasser besteht, wird sich im Uhrzeigersinn drehen.

Unser erster Nord-Süd-Schnitt mit kurzen CTD-Stationen bis 52°S zeigte keinen Hinweis auf den Wirbel, der in den Altimeterbildern zu sehen war. So beschlossen wir einen zweiten Schnitt Richtung Nordosten zu legen, allerdings nur unter Verwendung des ADCP, um Zeit zu sparen. Der Schnitt zeigte auch kein Ergebnis, d.h. alle Pfeile waren nach Osten gerichtet, so fuhren wir einen dritten Schnitt, um das Gebiet zwischen den zwei Schnitten zu schneiden. Dieses Mal war ein Bündel von langen Pfeilen, die in südwestliche Richtung zeigten, deutlich zu sehen. Unmittelbar daneben befand sich ein gleich großes Pfeilbündel, das in die entgegengesetzte Richtung zeigte. Die Physiker vermuteten, dass die beiden Bündel zusammen die "Nabelschnur" eines sich gerade abschnürenden Wirbels anzeigen. Ein junger Wirbel könnte länger leben, so beschlossen wir, etwas Zeit für die Erkundung zu investieren, um festzustellen, ob alle unsere Bedingungen erfüllt sind.

Wir verbrachten die nächsten Tage mit der Kartierung des Wirbels anhand von Nord-Süd-Schnitten, die mit kurzen CTD-Stationen alle 12 Meilen versehen waren. Das Bild, das sich während dieser Zeit herauschälte, bestätigte die Vorhersage der Physiker. Es handelte sich um einen jungen Wirbel mit einem ellipsoiden kalten Kern von 130 km Länge und 50 km Breite, der unter 300 m Tiefe reichte, rundum abgeschlossen war und im Norden von der schnellen Strömung der Polarfront begrenzt wurde. Die Silikatkonzentrationen im kalten Kern waren sehr hoch. Offensichtlich war diese Wassermasse von weit südlich der Polarfront nach Norden verschleppt worden. Alle Bedingungen waren erfüllt, wir hatten unser Ziel erreicht. Ein Grund zur Sorge ist die ellipsoide Form des Kerns, die sich mit der Zeit abrunden wird. Die Wirkung

auf den gedüngten Fleck ist unsicher. So könnte der Fleck zu einer Spirale lang gezogen werden und ein Teil in der Umgebung verschwinden. Um diese Gefahr zu verringern, bestimmten wir das Zentrum des kalten Kerns mit einem engen ADCP Raster, um die Düngung genau im Zentrum vorzunehmen. Dort setzten wir eine Treibboje aus und am Sonntagnachmittag führten wir die erste volle Station durch. Diese dauerte bis in die frühen Morgenstunden des Montags und erfüllte alle Wünsche sämtlicher Gruppen an Bord. Mit dieser Station haben wir die Anfangsbedingungen des Experiments bestimmt.

Während der Erkundung des Wirbels durch die Physiker beschäftigten sich andere Gruppen mit eigenen Messungen der Oberflächeneigenschaften der durchquerten Wassermassen. Hohe CO<sub>2</sub> und Nährstoffgehalte im kalten Kern des Wirbels zeigten, dass dort bisher nur wenig biologische Aktivität stattgefunden hatte. Eisenkonzentrationen waren sehr niedrig, wie auch die des Phytoplanktons (die einzelligen Planktonalgen). Die Chlorophyllkonzentrationen von nur 0,2 mg Chl/m<sup>3</sup> lagen fünffach niedriger als in der Polarfront. Wahrscheinlich hatten die Algen an der Front einen "Eisenschub" bekommen. Die Quelle des Eisens könnte auftreibendes Tiefenwasser entlang der Front, lokal begrenzte Zufuhr vom Staub oder schmelzende Eisberge gewesen sein. Uns waren bisher 5 stattliche Eisberge begegnet. Deren Eismassen enthalten viel Staub und sind somit bekannte Eisenquellen. Eine der Stationen fand zufällig so dicht an einem Eisberg statt, dass ein Antarktisneuling sich erkundigte, ob wir das Schiff angehalten hätten, um die schöne Form, die riesigen emporschlagenden Brecher und die weichen Farbtöne in grau, weiß und blau zu bewundern.

Das Wetter hat sich bisher sehr gut verhalten. Die steife Brise, die vor und während der Düngung blies, sorgte für eine gute Durchmischung des gedüngten Wassers, ohne das Wohlsein oder die Arbeit zu beeinträchtigen. Wir sind nun in die zweite Phase des Experiments eingetreten und freuen uns auf die weiteren Entwicklungen. Testflüge mit dem LIDAR System zur Vermessung der Chlorophyllkonzentrationen im Oberflächenwasser vom Hubschrauber sind erfolgreich verlaufen. Wir sind nun zuversichtlich, dass unser bestellter "Acker" aus der Luft schnell vermessen werden kann, wenn die Algen zu blühen beginnen.

Mit herzlichen Grüßen von einem gespannten Schiff,  
Victor Smetacek

Die letzte Januarwoche verbrachten wir mit der Vermessung des Wirbels, der Bestimmung des Zentrums und der detaillierten Aufnahme der Anfangsbedingungen des Experiments. Am frühen Montagmorgen (02.02.) fingen wir endlich zu düngen an. Wir wendeten dieselbe Prozedur an, die sich während unseres ersten Experiments EisenEx bewährt hatte. Eine angesäuerte Lösung von Eisensulfat wurde ins Schraubenwasser gelassen, während Polarstern mit 8 km/Std entlang einer Spirale von 250 km Länge vom Wirbelzentrum nach außen fuhr. Die Kreise waren 1 km von einander entfernt und bis Dienstagmorgen hatten wir einen 150 km<sup>2</sup>, kreisrunden Fleck von 14 km Durchmesser gedüngt. Die Fahrtroute erschien als eine perfekte Spirale auf dem Bildschirm, ein Beweis für hervorragende Arbeit der Schiffsnavigatoren, die die während EisenEx entwickelte Methode anwendeten.

Die Menge an Eisensulfat wurde berechnet, um die sehr niedrigen Eisenkonzentrationen im ACC auf Werte zu heben, die für Küstengewässer typisch sind: von ca. 5 auf 100 Nanogramm/l. Dafür verwendeten wir 7 Tonnen Eisensulfat (wir haben noch 20 Tonnen in Reserve), d.h. 1 kg für ca. 2 Millionen Kubikmeter. Diese Zahl vermittelt einen Eindruck von der winzigen Eisenmenge, die das eisenarme Plankton auf Trab bringen kann. Wir benutzten dasselbe Eisensulfat, das in Gärtnereien als Rasendünger verkauft wird und etwa 100 Euro pro Tonne kostet. Die Eisenlösung wurde von 2 Freiwilligen in Schutzkleidung und Gasmasken (Eisensulfat ist nicht giftig, aber der Staub kann Augen und Nase reizen) in einem Container mit einem großen Trichter vorbereitet, der mit einem 10 m<sup>3</sup> Tank verbunden war. Jede Schicht kippte den Inhalt von 31 Säcken a 25 kg Gewicht in den Trichter und spülte das Pulver mit einem Seewasserschlauch in den Tank. Ein zweiter Tank mit vorbereiteter Lösung wurde während dessen entleert. Insgesamt kamen 9 Tanks zum Einsatz.

Das Phytoplankton reagierte binnen Stunden auf die Eisenzugabe durch Erhöhung der Leistung der photosynthetischen Maschinerie, als hätten sie, wie im Auto, die Gangschaltung betätigt. Dieser Leistungsindex wird kontinuierlich mit einem Fast Repetition Rate Fluorometer (FRRF) an Algenzellen registriert, die in der Seewasserleitung vorbeiströmen. Das Instrument blitzt die Zellen mit Blaulicht in Nanosekudentempo an. Ein Teil des Blaulichts wird von den Pigmenten absorbiert und davon ein Teil für die Photosynthese verwendet. Der überschüssige Rest wird als Rotlicht wieder abgestrahlt und vom FRRF gemessen. Je höher die Effizienz, desto geringer der Anteil des abgegebenen Rotlichts. Die photosynthetische Maschinerie der Zelle wird von eng aneinander gekoppelten Molekülen unterschiedlicher Funktion getrieben. Eisenhaltige Enzyme spielen eine entscheidende Rolle beim Energietransfer. Bei Eisenmangel entsteht ein Engpass, der bei Eisenzufuhr schnell behoben werden kann. Auch das lichtaufnehmende, wasserspaltende Pigment Chlorophyll kann nur von bestimmten Enzymen aufgebaut werden, die ebenfalls Eisen enthalten. Je größer die Anzahl dieser Enzyme, desto grüner werden die Zellen und umso schneller können sie sich teilen.

Das FRRF hat bisher gleichmäßig niedrige Werte ( $F_v/F_m$  zwischen 0,28 und 0,32) über das gesamte Gebiet registriert, auch dort, vor allem entlang der Polarfront, wo Chlorophyllwerte höher lagen und gesunde, sich teilende Kieselalgenzellen unter dem Mikroskop beobachtet wurden. Die Planktonalgen im Wirbelzentrum wiesen ähnlich niedrige Werte auf, obwohl sie nicht besonders gesund aussahen. Als wir aber unsere Kreise während der Düngung drehten, waren die Werte am westlichen Rand schon auf über 0,4 gestiegen. Offensichtlich breitete sich der Fleck an dieser Stelle schneller aus, so dass wir bereits gedüngte Algenzellen antrafen, die schon den zweiten Gang eingelegt hatten. Allerdings war die Saatpopulation so gering, dass es 3 Wochen gedauert hätte, trotz des verstärkten Wachstums, bis die Konzentrationen im Wirbelzentrum denen der Polarfront entsprechen würden. Eine richtige Blüte hätte 2 weitere Wochen in Anspruch genommen.

Während der ganzen Zeit behielten wir den zweiten Wirbel bei 2° Ost im Auge. Er erschien kreisrund auf den Satellitenbildern, war schon seit Dezember zu sehen, und hatte somit Ähnlichkeit mit dem EisenEx-Wirbel, der sich als Experimentierfeld bestens bewährt hatte. Weil unser gedüngter Fleck noch 3 Wochen bis zur Begrünung brauchen würde, entwickelten wir einen Plan, den zweiten Wirbel zu erkunden und, sollte er geeignet sein, dort zu bleiben. Im anderen Fall würden wir zu unserem ersten Wirbel zurückkehren und den Fleck mit Hilfe des FRRF wieder finden. Während der ersten Wochen war ohnehin nicht mit großartigen Veränderungen zu rechnen. Der Hauptgrund für diesen Plan war das neueste Satellitenbild der Chlorophyllverteilung im Gebiet, das deutlich höhere Werte in der Umgebung des westlich gelegenen Wirbels zeigte. Die Konzentrationen im Süden, wo unser Wirbel herstammte, waren extrem niedrig. Falls die Chlorophyllwerte im zweiten Wirbel in der Tat so hoch waren, wie bei uns an der Polarfront, würden wir mindestens 2 Wochen gewinnen, selbst wenn wir eine Woche später dort düngen würden.

Die Entscheidung wurde während des Düngens gefällt, als wir die Ergebnisse der ersten Station im Wirbelkern im Rahmen unseres regelmäßigen Abendtreffens diskutierten. Der Vorteil unseres Wirbels war seine Jugend und die Ortsfestigkeit seines Kerns. Sein Nachteil war die niedrige Saatpopulation großer, blütenbildender Kieselalgen (ein Zehntel der von EisenEx), gekoppelt mit großen Schwärmen hungriger Salpen, die die Netze in den Nachtstunden füllten.

Salpen sind merkwürdige 1-10 cm lange, tonnenförmige, wässrige Tiere, die entfernt an Quallen erinnern, obwohl sie näher mit Wirbeltieren verwandt sind als mit den übrigen Zooplanktern. Salpenschwärme sind im ACC und anderen Gebieten niedriger Produktivität häufig zu finden, weil sie sehr ökonomisch mit geringen Ressourcen umgehen können. Sie benutzen dieselben Bewegungen zum Fressen, Atmen und Schwimmen und können ca. 10 m in der Minute zurücklegen. Die Tage verbringen sie in der Tiefe und steigen nachts in die Oberflächenschicht, um zu fressen. Dafür pumpen sie beträchtliche Mengen Wasser durch ein feinmaschiges Sieb, das düsenartig hinten ausgepresst wird und ihnen Antrieb verleiht. Salpen vermehren sich durch

Knospung und können in wärmeren Gewässern mehrere ausgewachsene Individuen pro Tag erzeugen. Somit wären sie der Stoff von Horrorfilmen in der aquatischen Alienwelt. Bei höheren Partikelkonzentrationen verstopft das Sieb, weshalb sie partikelarmes Wasser bevorzugen. Es gibt Hinweise, dass ihre beachtliche Pump- und Vermehrungsleistung den Aufbau von Blüten in Schach halten kann. Ihre Abundanz im Wirbelkern würde die Blütenentwicklung zumindest verlangsamen, wenn nicht gar im Keime ersticken.

Nach einer ausführlichen Debatte beschlossen wir den zweiten Wirbel, der auf demselben Breitengrad aber 2 1/2 Tage Fahrt entfernt lag, zu inspizieren und fuhren unmittelbar nach der Düngung am Dienstag Morgen (03.02.) Richtung Westen los. Auf dem Weg kamen zwei starke Stürme auf uns zu, so wichen wir 350 km nach Norden aus, um Unannehmlichkeiten zu begrenzen. Die Stürme sind auch über den ersten Wirbel hinweggefegt, so hätten wir auch dort ausweichen müssen. Die Stürme kosteten uns 3 Tage und am Montagmorgen nahmen wir Kurs auf den zweiten Wirbel. Voller Spannung verfolgten wir die Temperatur- und Salzgehaltswerte auf den Datenmonitoren sowie die Ergebnisse der Nährstoff-, CO<sub>2</sub>-, Chlorophyll- und Planktonmessungen. Die erste Erleichterung kam mit den Untersuchungen des angereicherten Wassers unter dem Mikroskop. Als wir in das vermeintliche Wirbelgebiet vorgedrungen waren, sahen wir reichlich gesundes Plankton. Auch die anderen Werte bestätigten diesen Eindruck. Nach Beendigung des Schnitts am Abend lagen auch die ADCP-Profile vor: Auf den Bildern war ein starkes nach Westen setzendes Strömungsband zu sehen: Wir hatten offensichtlich den Wirbel geschnitten! Während des dienstags führten wir weitere Schnitte durch das Wirbelgebiet durch, die daraufhin deuteten, dass wir einen deutlichen, allerdings kleinen Wirbel erwischte hatten dessen abgeschlossen-er Kern von 50 x 60 km erhöhte Silikatgehalte aufwies. So beschlossen wir hier zu bleiben und werden während des mittwochs (11.02.) mit der Düngung beginnen. Die Stürme haben die Neulinge aufgeregt und beeindruckt, aber mittlerweile haben sie gelernt, die raue See in diesem entlegenen Teil des Planeten als Alltag zu akzeptieren.

Mit herzlichen Grüßen von einem mächtigen Schiff, das Wind und Seegang im Grenzgebiet zwischen den Roaring Forties und Furious Fifties sehr gut auszuhalten vermag,

Victor Smetacek

Die aufgeregte Spannung vermischt mit Ungeduld, die während der vergangenen Wochen an Bord herrschte, ist nun ersetzt durch eine gelassene Erwartung der Dinge, die nicht weiter beeinflusst werden können. Wir haben umgeschaltet vom Jägerdasein, voll Unsicherheit darüber was die nächste Biegung der Front mit sich bringen wird, zur fatalistischen Geduld des Bauern, der sein mühsam bestelltes Feld für die kommenden fünf Wochen bewacht.

Es mag komisch erscheinen, dass in diesen endlosen ozeanischen Weiten geeignete Flächen für unser Experiment so winzig klein sind und mit solchem Aufwand gesucht werden müssen. Eigentlich könnte man eine beliebige Fläche düngen, weil das Plankton über die weiten Flächen dieses Ozeans unter Eisenmangel leidet. Das Problem ist es aber, einen Wasserkörper zu finden, der seine Form über die Zeitskalen unseres Experiments beibehält. Die Strecke des ACC im Atlantischen Sektor ist besonders dynamisch und schnell strömend und auch die ruhigeren Stellen zwischen den Strombändern sind kurzlebig. Eine undefinierte Wassermasse zu düngen, birgt Gefahren in sich, die im schlimmsten Fall zu einem Auseinanderreißen der gedüngten Fläche führen kann. Eine weitere Unsicherheit ist die ungleiche Verteilung des Planktons, die quer zu den Fronten in Kilometerskalen variiert, und Schwierigkeiten bei der flächenmäßigen Bilanzierung der Prozesse erzeugen kann. Der Kern eines rotierenden, ortsfesten Wirbels ist der ideale Ort für die bescheidenen Ausmaße unseres Experiments, weil die Risiken möglichst klein gehalten werden. Ein weiterer Vorteil eines Wirbels im ACC ist die Kohärenz zwischen der Oberfläche und tieferen Schichten, die die Verfolgung der absinkenden Partikel durch die Wassersäule ermöglicht.

Die Entscheidung unseren neuen Wirbel zu düngen wurde nach der Sichtung der Ergebnisse von mehreren langen Schnitten gefällt. Die Physiker erzeugten aus den stacheligen, mit Bündeln von Pfeilen versehenen ADCP-Abbildungen eine geglättete Darstellung des Strömungsfelds, auf dem ein geschlossener, birnenförmiger Wirbelkern von 80 x 120 km Ausmaß umgeben von einer schnell strömenden Schleife zu erkennen war. Die Silikatkonzentrationen im Oberflächenwasser entlang der Schnitte passten hervorragend in das Bild. Innerhalb des Kerns lagen sie bei 19 Micromol/Liter und fielen auf 4 bzw. 7 am Nord- und Südrand der Wirbelschleife. Der Wirbelkern repräsentierte das südlich gelegene, silikatreiche Wasser. Das Zentrum des Kerns musste aber genau bestimmt werden, so legten wir ein kleinräumiges ADCP-Raster auf die vermutete Stelle, das bis Mittwochmittag dauerte. Der geschlossene Kern hatte sich seit mindestens einem Monat gedreht und sollte daher homogen durchmischt sein. Die Annahme wurde durch Messungen der CO<sub>2</sub>- und Nährstoffkonzentrationen innerhalb des Rasters bestätigt. Die Gleichmäßigkeit der Werte zeugte von den hervorragenden analytischen Fähigkeiten unserer Chemiker.

Mittwochnachmittag wurde das Zentrum festgelegt und die Treibboje dort ausgebracht. Danach wurde eine lange Station mit 5 CTD-Höls neben der

treibenden Boje durchgeführt, um den erheblichen Wasserbedarf der verschiedenen Gruppen zu decken. Dazwischen kamen andere Geräte, vor allem Zooplanktonnetze zum Einsatz. Die Station dauerte die ganze Nacht und Donnerstagsmorgen führte die raue See zu einigen Verzögerungen, sodass wir erst am Nachmittag endlich mit der Düngung beginnen konnten. Die gleiche Prozedur wie bei der ersten Düngung wurde angewendet, nur kreiste Polylarstern diesmal um die Boje. Danach führten wir eine kurze Station im gedüngten Wasser neben der Boje durch, damit die Physiologen die unmittelbare Reaktion der Organismen aufnehmen konnten, gefolgt von einer längeren Station im Wirbelkern aber außerhalb des Flecks. Diese Station diente als Referenz und wird später regelmäßig durchgeführt, um die Prozesse im gedüngten und ungedüngten Wasser miteinander zu vergleichen. Die homogenisierte Wassermasse innerhalb des Kerns gewährleistet diesen Vergleich.

Samstag begannen wir mit der Vermessung der großräumigen Hydrographie des Wirbels mit kurzen CTD Stationen in 20 km Abständen. Etwa eine Woche werden wir hierfür benötigen und längere Stationen im Bereich des Flecks durchführen, um chemische und biologische Prozesse dort zu verfolgen. Die Sonden auf der Boje haben gezeigt, dass sie sich spiralförmig im Strömungsfeld bewegt und nicht von den stetigen westlichen Winden beeinflusst wird. Sonntagnacht führen wir dicht an der Position der Boje vorbei und wurden durch die vom FRRF gemessenen hohen Werte des Fv/Fm Verhältnisses erfreut. Die Werte von 0,45 lagen deutlich höher als im umgebenden Wasser. Unsere gedüngten Algen haben ihr Wachstumspotential erhöht, aber es wird eine Woche dauern, bis die Algenbiomasse sich verdoppelt, weil nicht alle Arten gleichmäßig reagieren werden. Einige wenige Arten werden sich in die langanhaltende, schnelle Wachstumsphase begeben und die Blüte dominieren. Manche werden gar nicht reagieren, aber die meisten werden entweder langsam aber stetig weiter wachsen oder kurze Wachstumsschübe mit Pausen dazwischen einlegen. Um zum Vergleich mit Landökosystemen zurückzukommen, könnte der Zirkumpolarstrom als Halbwüste wie die Sahelzone betrachtet werden. Die meisten Pflanzen (wie kaktusähnliche Sukkulente) sind an Trockenheit angepasst und werden auf den Eisenregen mit einem Wachstumsschub reagieren. Es sind aber die Gräser, die die braune Landschaft in eine grüne Wiese verwandeln und sie brauchen etwas Zeit, um sichtbar hervorzutreten. Wir sind noch am Raten, welche Arten die "Gräser" in unserer Blüte stellen werden.

Der rotierende Kern dieses Wirbels hatte schon zuvor biologische Aktivität erfahren und führte daher mehr Plankton mit sich als der erste Wirbel. Die Chlorophyllkonzentrationen von 0,7 mg/m<sup>3</sup> werden hauptsächlich von großen Arten gestellt, die auch die meiste Biomasse in der Anfangsphase der Blüte beitragen werden. Der erste Wirbel war an diesen Arten verarmt und hätte mehrere Wochen gebraucht, um die hiesige Biomasse aufzubauen. Vielleicht länger, wenn man die nächtlichen Angriffswellen der Salpen in Betracht zieht. Salpen sind auch hier vertreten, scheinen aber nachts unterhalb der algenreichen Schicht zu bleiben, die sich bis 100 m Tiefe erstreckt. Vermutlich meiden sie die stacheligen Algen, die im Wirbelkern

vorherrschten.

Ein Blick durchs Mikroskop auf eine angereicherte Planktonprobe aus dem Wirbelkern offenbart eine große Formenvielfalt, die von den langen, geschwungenen Borsten der etwa 10 anwesenden Arten der Kieselalpengattung *Chaetoceros* beherrscht wird. Aus den rechteckigen Zellen dieser kettenbildenden Gattung entspringen jeweils 4 Borsten, die die Zellen um ein Vielfaches überragen. Diese spitz zulaufenden Siliziumborsten sind hohl und bei den größeren Arten mit Widerhaken besetzt. Ihre Funktion ist mit Stacheln von Landpflanzen vergleichbar, d.h. sie dienen der Abwehr von Fraßfeinden. Viele Tiere schaffen es trotzdem, die Zellen zu fressen. Anscheinend gehören Salpen nicht zu dieser Kategorie. Die Borsten haben auch eine andere Funktion: Am Ende der Blüte, wenn die Nährstoffe zu Neige gehen, werden sie klebrig und verhaken sich mit anderen Ketten zu Flocken, die wie Schnee herabrieseln. Dieses Verhalten wird bei küstennahen Arten, von denen einige auch hier vertreten sind, regelmäßig beobachtet. In der Planktonprobe sind auch viele andere Kieselalgen-gattungen zu sehen, manche nadelförmig, andere wie dicke Münzen. Wir sind gespannt festzustellen, welche Arten die Blüte dominieren werden, und welche Eigenschaften dafür notwendig sind.

Das Wetter forderte uns die ganze Woche mit Windstärken um 7 Beaufort. Wir sind dankbar, wenn der Wind gelegentlich auf 5 oder 6 zurückgeht und die Ozeanoberfläche weniger aufgewühlt erscheint. Glücklicherweise sind wir von Stürmen verschont worden, seitdem wir hier angekommen sind. Wir haben uns an die ständige Schaukelei gewöhnt, die das Arbeiten und Schlafen gelegentlich erschwert aber nicht stark beeinträchtigt. Nur Polarstern kann diesen Komfort in dieser See bieten.

Mit herzlichen Grüßen vom aufgewühlten Ozean,

Victor Smetacek

Das dreidimensionale Bild des Gesamtwirbels, dessen Kern wir gedüngt hatten, erschien Scheibe um Scheibe während der letzten Woche. Die Physiker legten ein Raster von 8 Nord-Süd-Transekten zwischen  $48^{\circ} 48' S$  und  $50^{\circ} 36' S$  (108 Seemeilen = 200 km) mit jeweils 10 Stationen 20 km auseinander, so dass drei der mittleren Schnitte (ebenfalls 20 km auseinander) durch den Wirbelkern gingen. Die anderen Schnitte erfassten die angrenzende Front, die wie eine Schleife den Kern umschlingt. Wir hatten es eilig: Die Vermessung des dynamischen Strömungsfeldes musste zügig erfolgen und wir brannten darauf, unseren gedüngten Fleck am Ende des Grids zu besuchen. So wurden bei den meisten Stationen die CTD auf 500 m gefahren ohne Flaschen zu schließen, weil dies viel zusätzliche Zeit gekostet hätte. Nur auf einigen Stationen wurden Wasserproben genommen und Netze gezogen. Freitag, um Mitternacht, hatten wir den Grid an seiner nordöstlichen Ecke abgeschlossen und fuhren unmittelbar danach in südwestliche Richtung zur Boje, die am Südrand des Kerns seit einigen Tagen verharrte. Stürmisches Wetter kam auf uns zu und da wir ohnehin in der schweren See nicht arbeiten konnten, fuhren wir in den Wind und an der Position der Boje vorbei. Als der kurze Sturm sich legte, fuhren wir wieder zurück. Unser Meteorologe sagte ruhigeres Wetter und kürzere Wellen, die Stationsarbeit erlauben würden, für den Sonntagmorgen voraus, so richteten wir uns darauf ein.

In den 8 Tagen seit der Düngung hatte die Boje eine geschlossene ovalförmige Drehung von 30 km x 50 km vollzogen. Zwei der Transekte des Grids führten dicht an der Bojenposition vorbei und jedes Mal zeigte das FRRF kräftig wachsendes Plankton an (anhand des Fv/Fm Index), allerdings für nur kurze Strecken. Offensichtlich lag die Boje nicht mehr im Zentrum des Flecks. Die hohen Werte hoben sich deutlich von den gleichmäßig niedrigen Werten der ganzen Gegend ab. Das zweite an der CTD angebrachte FRRF zeichnete gleichmäßig hohe Werte bis 90 m Tiefe bei der Station in der Nähe der Boje. Da wir eine raue See im Anschluss an zwei Stürme gedüngt hatten, hatte sich das Eisen mit dem Phytoplankton inzwischen gründlich vermischt. Die häufigen Stürme hatten so wenigstens einen guten Zweck erfüllt. Sie sind ohnehin Teil des Alltags hier und bevor die entscheidende Rolle des Eisens durch die Düngungs-Experimente bestätigt wurde, hatte man die schlechte Witterung (ständige Bewölkung, Nebel, tiefe Durchmischung sowie niedrige Temperaturen) für die niedrige Produktivität in diesen nährstoffreichen Gewässern verantwortlich gemacht.

Samstagabend erreichten wir die Boje und hatten die Nacht, um die Lage, Form und das Zentrum des gedüngten Flecks ausfindig zu machen, um dort die langersehnte Station durchzuführen. Wir wussten nur, dass der Fleck in Bojennähe war, nicht aber wo er lag, ob er sich ausgebreitet hatte, kompakt oder ausgefranst war. Die niedrige Wolkendecke verhinderte eine Erkundung per Hubschrauber, weil der Laserstrahl mit dem das Chlorophyll angeregt wird, eine Mindesthöhe verlangt. Mit einem deutlichen Chlorophyllanstieg rechneten wir nicht, weil das Plankton hier wegen der niedrigen Temperaturen gemächlich wächst.

Die Nacht wurde mit der Suche mittels FRRF nach dem Fleck verbracht. Die Daten, die als farbige Pünktchen entlang der Fahrtroute des Schiffes in Minutentakt erscheinen, waren auf allen Bildschirmen des Borddatennetzes zu sehen. Die gewählte Farbskala reicht von dunkelblau (niedrige Werte) über hellblau, grün und gelb bis hin zu rot (für sehr hohe Werte). Die Strecken an der Boje vorbei hatten streifenartige Muster von dunkelblauen bis grünen Punkten angezeigt. Wir vermuteten den Fleck nördlich der Boje, so fuhren wir erst weiter auf nordöstlichen Kurs, kehrten dann um, und fuhren einen Schnitt nach Westen, etwa 10 km nördlich der Boje. Für eine Weile erschienen nur dunkelblaue Punkte, dann plötzlich und in schneller Folge tauchten grüne gefolgt von gelben Punkten auf, die über eine 20 km lange Strecke tonangebend waren. Wir hatten den gedüngten Fleck gefunden und er schien kompakt zu sein! Innerhalb von Minuten waren wir wieder außerhalb des Flecks, der offensichtlich auf beiden Seiten scharf abgegrenzt war. Nun mussten wir die Ränder des Flecks im Norden erkunden, so fuhren wir in nordöstlicher Richtung bis wir 15 km nördlich von der Mitte des bunten Abschnitts auf dem Ostwestschnitt lagen und fuhren dann senkrecht nach Süden. Die Diagonale im Nordwesten war monoton dunkelblau, aber als wir nach Süden fuhren, wurde es plötzlich wieder bunt, diesmal sogar mit orangenen Tupfen zwischen den grellgelben Pünktchen. Die Mitte war gefunden. Wieder hatten wir homogene hohe Signale für über 20 km. Danach erschienen hellblaue Töne, eine Folge der stärkeren Verdünnung in Bojennähe im südöstlichen Rand. Noch 2 Diagonalen und wir hatten den Fleck eingekreist und ein Kreuz durch die Mitte gelegt. Noch vor dem Frühstück fingen wir dort mit der Station an.

Die Station dauerte bis spät in die Nacht. Danach erkundeten wir den übriggebliebenen nordöstlichen Rand und führten die zweite Referenzstation nördlich des Flecks am Montagmorgen durch. Das Chlorophyllprofil im Fleck zeigte gleichmäßige Werte von 1,6 mg/m<sup>3</sup> bis 90 m Tiefe, die deutlich höher lagen, als die Werte außerhalb, und bei der Referenzstation: 0,7 mg/m<sup>3</sup>. Werte bis 2,2 mg Chl. waren vereinzelt im Oberflächenwasser von der Chlorophyllgruppe während der FRRF Suche gemessen worden. Die Algen waren während der letzten 8 Tage außerordentlich stark herangewachsen. Ein Blick durch das Mikroskop bestätigte den Befund: Alle dominanten Arten waren in schnellem Wachstum begriffen, die sich in der Häufigkeit der sich teilenden Zellen sowie der Anzahl der Zellen pro Kette zeigte. Wo sonst 4 Zellen pro Kette die Regel war, kamen jetzt Ketten mit 20 Zellen zum Vorschein. Der Rekordhalter war die kleine *Chaetoceros curvisetus* mit 30 Zellen. Der Größenunterschied zwischen dieser Art und den riesigen *Chaetoceros* Arten, die im letzten Bericht beschrieben wurden, ist der zwischen einem kleinen Busch und einem großen Baum. Aber hier hört der Vergleich mit Landökosystemen auf, weil auf dem Land die großen Bäume über die kleinen Büsche wachsen und ihnen das Licht wegnehmen. Im Wasser dagegen bewegen sich alle Algen mit dem Medium in dem sie schweben. Somit können nur schnell wachsende Arten die anderen überschatten und schließlich sich selbst. Je kleiner die Zellen, desto schneller können sie sich teilen.

Das bewegte Wasser versorgt die Algen sowohl mit Licht als auch mit Nährstoffen. Im Gegensatz zu Landpflanzen benötigt das Phytoplankton keine Stützsubstanzen zum Bau von komplexen Gerüsten. Somit besteht die Hälfte ihres Gewichts aus Eiweiß, etwa im gleichen Verhältnis wie bei allen Tieren. Die Algen können nur soviel Biomasse aufbauen, wie die Nährstoffe Phosphor und Stickstoff, die die Produktivität der eisenreichen Ozeanränder bestimmen, zur Verfügung stehen. Wenn alle Nährstoffe im Fleck von Algen in Biomasse umgewandelt würden, stiegen die Chlorophyllkonzentrationen auf 60 mg/m<sup>3</sup> und das Licht wäre schon in den obersten Metern aufgenommen. Unsere Blüte wird bescheidener ausfallen, aber diese Berechnung soll nur einen Eindruck vom enormen Produktionspotential dieser Gewässer vermitteln. Zu diesem Thema kehren wir später zurück.

Die Stimmung an Bord ist gut und gute Laune strömt einem in den Labors entgegen, in der Messe und in den Versammlungsräumen. Das gemeinsame Ziel kommt in den regelmäßigen Abendtreffen, die von allen besucht werden, zum Ausdruck. Nach dem Wetterbericht werden die Geschehnisse und Ergebnisse des Tages behandelt und der Plan für den nächsten Tag besprochen. Danach werden Vorträge zum Thema von Vertretern der verschiedenen Gruppen gehalten. Angelegenheiten des Alltags werden auch besprochen, so sind Gerüchte nur von kurzer Lebensdauer. Der Kapitän, die Offiziere und der Schiffsarzt kommen auch zu den Treffen und scheinen von unserem Vorhaben und unserer Herangehensweise fasziniert zu sein: Das Schiff wird erst mit ADCP und dann mit dem FRRF gelenkt, um die sprichwörtliche Nadel im Heuhaufen zu finden. Wir finden unsere Ergebnisse aufregend und sind dankbar, dass das Glück bisher auf unserer Seite war.

Mit herzlichen Grüßen vom Schiff, das gerade eine Station durchfährt und möglichst viel schaffen möchte, bevor die angekündigten starken Winde hier eintreffen.

Victor Smetacek

Dies war unsere fünfte Woche auf dem Antarktischen Zirkumpolarstrom (ACC), einer der unattraktivsten Orte für Menschen auf der Erde. Es gibt keine Fischereischiffe und selbst die Extremtouristen, die Herausforderungen zum Überwinden suchen, kämen nicht auf die Idee hier 2 Monate zu verbringen. Das Schiff ist in ständiger Bewegung in einer von stetig starken westlichen Winden aufgepeitschter See. Die Luft ist genau so kalt wie das Wasser, dessen Temperatur im Fleck im vergangenen spätsommerlichen Monat von 4,0 auf 4,5°C gestiegen ist. Die See um uns und der Himmel über uns sind grau, und farbige Sonnenuntergänge sind so selten, dass sie von der Brücke bekannt gegeben werden. Selbst der wachhabende Offizier holt dann seine Kamera hervor. Es muss gute Gründe geben, weshalb so viele von uns diese unwirkliche Gegend für die Forschung ausgesucht haben. Der Grund ist einfach, der ACC ist ein wissenschaftliches El Dorado. Die bedeutsame Rolle im globalen Wärmehaushalt ist lange bekannt, aber inwieweit die hiesigen Lebewesen eine Rolle in der Klimamaschinerie spielen, wird gegenwärtig heiß diskutiert. Es dreht sich um die Frage, wie produktiv der ACC in den Eiszeiten war. Unser Experiment wird Daten zur Klärung dieser und anderer Fragen liefern.

In der letzten Woche führten wir lange Stationen innerhalb und außerhalb des Flecks durch und verbrachten die Zeit dazwischen mit seiner Kartierung. Der Fleck erstreckt sich über ein Areal von ca. 20 x 30 km mit 2 Gebieten, wo die Chlorophyllkonzentrationen 2 mg/m<sup>3</sup> übersteigen, dazwischen sind die Werte niedriger, aber mehr als doppelt so hoch als im umgebenden Wasser. Nach der ersten Vermessung des Flecks nahmen wir die Boje auf, bestückten sie mit Instrumenten sowie 2 Sinkstofffallen, und setzten sie wieder in dem größeren Gebiet mit höherer Produktivität ein. Während der langen Station neben der Boje beobachteten wir, wie diese stetig nach Süden trieb, und waren am nächsten Tag sehr erleichtert, als sie plötzlich Richtung Westen drehte. Zurzeit treibt sie zusammen mit dem Fleck nach Norden.

Weil die Ausdehnung des Flecks zu seiner Verdünnung geführt hat, und das Phytoplankton einen Großteil des Eisens schon aufgenommen hatte, beschlossen wir, den gesamten Fleck erneut zu düngen. Wir fingen mit der Düngung am südlichen Rand an und fuhren im Zickzack in Abständen von 2 km nach Norden. Die Umkehrpunkte an den Ost-West Rändern des Flecks wollten wir mit dem FRRF bestimmen. Allerdings war der Tag vor der Düngung außergewöhnlich ruhig und sonnig gewesen und die FRRF Werte lagen niedriger als sonst. Offensichtlich hatten die Algen in der Oberflächenschicht Sonnenbrand bekommen und waren noch dabei die Schäden durch die erhöhte UV-Strahlung zu reparieren. Glücklicherweise gab es noch einen weiteren Parameter, um das Schiff zu lenken, bzw. den Rand des Fleckes zu erfassen: den CO<sub>2</sub>-Gehalt des Wassers, der mit ähnlicher Datendichte gemessen wird wie mit dem FRRF. Die Werte vor der Düngung waren im ganzen Fleck homogen gewesen, so zeigten niedrige Werte Aufnahme durch verstärktes Algenwachstum an und somit die Lage des Flecks. Wir verwendeten wieder 7 Tonnen Eisensulfat, diesmal über eine Fläche von 400 km<sup>2</sup> statt der ursprünglichen

Fläche von 150 km<sup>2</sup>.

Zurück zur wissenschaftlichen Begründung unseres Experiments: Der ACC liegt auf denselben Breitengraden wie Nordeuropa (unser Fleck ist dem Äquator näher als Bremerhaven) so ist dieser Gegend ebenso viel Sonnenschein beschieden wie der produktiven Nordsee. Wo das eisenarme ACC-Wasser mit Landmassen in Kontakt tritt, insbesondere an der Spitze der antarktischen Halbinsel, ist die Produktivität phänomenal hoch. Vor ihrer Dezimierung haben die Bestände der Großwale ca. 200 Millionen Tonnen Krill (der krabbenartige Krebs der sich von Kieselalgen ernährt) in einem ca. 5 Mio. km<sup>2</sup> großen Gebiet jährlich gefressen. Zum Vergleich stagniert der Weltfischfang aus dem gesamten Ozean bei 70 Mio. Tonnen seit Jahrzehnten. Allein die Krillerte entspricht etwa 0,25 kg Krebschen/m<sup>2</sup>. Man stelle sich die gleiche Menge Grashüpfer pro Wiesenfläche vor, um einen Eindruck vom enormen Produktionspotential dieser Gewässer zu bekommen. Umgekehrt werden sich die aquatischen Aliens wundern, warum an Land die Pflanzenbiomasse soviel höher als die Tierbiomasse ist. Dies kommt, weil Phytoplankton etwa gleichviel Eiweiß wie Tiere enthält, weshalb die Umwandlungseffizienz sehr viel höher liegt als bei Landpflanzen mit ihrem hohen Zellulose- und Ligningehalt. Dies erklärt auch die enormen Wachstumsraten der Blauwale, der größten Tiere, die es je gegeben hat. Vom befruchteten Ei zum erwachsenen Tier von ca. 70 Tonnen vergehen nur 4 Jahre! Warum gibt es denn immer noch so wenig Blauwale? Paradoxerweise scheinen die Krillbestände seit der Dezimierung der Wale ebenfalls stark zurückgegangen zu sein. Vielleicht hat das auf Walen basierende Nahrungsnetz die Nährstoffe, d.h. Eisen, effektiver rezirkuliert als das gegenwärtige Nahrungsnetz. In den dreißiger Jahren wurde von Diatomeenblüten in den produktiven Gebieten berichtet, die intensiver und ausgedehnter gewesen zu sein scheinen als die heutigen Befunde. Trotz der intensiven Nutzung durch Zooplankton ist ein bedeutender Teil der Biomasse aus der Oberflächenschicht herabgesunken. Dies spiegelt sich im erhöhten Kohlenstoffgehalt der dortigen Sedimente wider. Sind wir Zeugen des siechenden Zusammenbruchs eines spektakulären Ökosystems? Die Lösung der aquatischen Aliens zur Rettung der Wale wäre eine großflächige Eisendüngung ihrer Nahrungsgründe. Einige 100.000 Tonnen Eisen würden genügen, und die einzigen nennenswerten Kosten wären für den Transport. Ein eisverstärkter Tanker, der mehrmals im Jahr hin und her fährt würde reichen. Diese Option ist noch nicht in Betracht gezogen worden, sollte aber auf internationaler Ebene ernsthaft diskutiert werden.

Die Diatomeen der eisenreichen Küstengewässer, die die Wale und die anderen Tierbestände ernähren, unterscheiden sich von den hiesigen, und haben mehr Ähnlichkeiten mit Küstenplankton aus der übrigen Welt. Naturliebhaber haben Diatomeen noch nicht entdeckt, aber wenn sie es tun, wird der ACC wie ein Magnet auf sie wirken. Die größte Anzahl endemischer Arten (die nirgendwo sonst vorkommen) ist hier beheimatet und einige von denen gehören zu den Größten, und mit ihren geschwungenen Stacheln, zu den imposantesten Arten weltweit. Die wenigen tausend Wissenschaftler, die Phytoplankton erforschen, lassen sich in zwei Stämme teilen. Die Taxonomen geben sich große Mühe, viele Exemplare eingehend unter dem Mikroskop zu

studieren, um sie in Arten zu differenzieren. In ihrer natürlichen Umgebung werden sie aber nicht beobachtet. Der biogeochemische Stamm dagegen fährt zwar zur See, setzt aber nur chemische und biophysikalische (z.B. FRRF) Analysemethoden ein, um spezifische Moleküle (wie Chlorophyll) und den Gehalt der Algen an Elementen, vor allem Kohlen-, Stickstoff und Silizium, sowie ihre Wachstumsraten zu bestimmen. Arten werden nicht mal angeguckt. Dieser Stamm bemüht sich, den Beitrag der Bakterien und Phytoplankter an den globalen Stoffkreisläufen abzuschätzen. Dass solche Winzlinge von globaler Bedeutung sein können, ist auf ihre Anzahl, die selbst astronomische Zahlen in den Schatten stellt, zurückzuführen. Es gibt mehr Planktonzellen im Ozean (10<sup>29</sup>) als Sterne im gesamten Universum (10<sup>20</sup>). Viele Winzlinge bewegen eben Gigatonnen (10<sup>9</sup> Tonnen).

An Bord dieses Schiffes befinden sich die Anfänge eines neuen Stammes von Phytoplanktonökologen, die individuelle Arten mit Hingabe studieren, ihrer Anzahl bestimmen und sie beim Wachstum und gefressen werden beobachten. Sie haben herausgefunden, dass die kleineren, schwach verkieselten Arten im Fleck schneller wachsen als die früher beschriebenen, riesigen Arten, die vom Silizium exzessiv Gebrauch machen. Die Gruppe ist auch dabei, individuelle Zellen und Ketten für spätere genetische Analysen mühsam zu isolieren, um die Diversität innerhalb der jeweiligen Arten festzustellen und die Eigenschaften herauszufinden, die ihnen das schnelle Wachstum möglich macht. Die kleinen Arten sind dieselben, die in den produktiven Gebieten häufig sind, aber weil deren Anzahl zu Beginn sehr gering war, dominieren noch die Riesen. Mit genug Zeit und Eisen werden die kleineren Arten die Blüte übernehmen, wie die Gräser in den zuvor beschriebenen Halbwüsten. Es sind nur die kakteenartigen Riesen, die große Mengen Silizium benötigen. Die Diatomeen in den Walgründen verbrauchen wesentlich weniger, so erreicht Silizium limitierende Konzentrationen nur entlang der Polarfront, dem Reich der Riesendiatomeen. Diese setzen sich nur dort durch, weil unter eisenlimitierenden Bedingungen die kleinen Arten schneller weggefressen werden als sie wachsen können. Unsere Ergebnisse bestätigen somit die Hypothese, die im Anschluss von EisenEx aufgestellt wurde. Eisendüngung im offenen Ozean führt mittelfristig zur Etablierung von Küstenverhältnissen im Plankton. Mehr hierüber und über andere aufregende Ergebnisse im nächsten Bericht.

Mit herzlichen Grüßen von einem schaukelnden Schiff, das die wachsende Blüte bewacht,

Victor Smetacek

Im letzten Bericht wurde ein etwas düsteres Bild von unserer Gegend, dem ACC, als eine einheitliche, stürmische, graue Weite gezeichnet. In der Tat, bietet sich dieses Bild in den Bullaugen und auf dem Deck, wenn man beschäftigt ist. Gönnst man sich aber einige Minuten und lässt die Augen auf der unruhigen See ruhen, so wird der Blick gefangen genommen, wie von einem flackernden Feuer, durch die immer wechselnden Muster von steigendem Schwell, brechenden Wellen und umher fliegenden Gischtstreifen. Unter nebligem Himmel ist die See dunkel stahlgrau mit einem blauen Glanz auf den Wellenkämmen. Wenn aber die Sonne im klaren Himmel scheint und die See ruht, wird der ACC in eine mediterranblaue Welt umgewandelt, gerahmt vom leuchtenden Weiß der Wolken am Horizont (das nächste Tief). Hätten wir blauen Himmel in den letzten Tagen gehabt, wäre uns aufgefallen, dass die See nicht mehr so blau leuchtet, sondern einen türkisen Ton angenommen hat. Unsere Blüte ist schon soweit herangewachsen, dass sie die Farbe des Wassers beeinflusst. Chlorophyllkonzentrationen über 2,5 mg/m<sup>3</sup> reichen bis in 100 m Tiefe und sogar in 150 m Tiefe sind die Werte manchmal so hoch wie im Oberflächenwasser der ungedüngten Umgebung. Könnte man unsere Blüte auf eine 10 m tiefe Schicht kondensieren (die normale Tiefe der Oberflächenschicht in Küstengewässern), so wäre die Farbe gelblich braun wie in der Nordsee während der regelmäßigen Frühjahrsblüte von Diatomeen. 2,9 mg Chlorophyll/m<sup>3</sup> war der bisher höchste Wert in unserer Blüte.

Mitte der letzten Woche hatte die Boje ihre zweite ovale Runde im Wirbel gedreht, die mit der ersten fast identisch war. Nun weilte sie wieder in der südöstlichen Ecke, wo die Wirbelschleife offen ist und die Gefahr am größten, sie in den Stromschnellen der Polarfront zu verlieren. Da wir ein kurzes, günstiges "Wetterfenster" hatten und die Zeit gekommen war, die Geräte zu versorgen, bargen wie die Boje in der Absicht, sie wieder in den westwärts strömenden Fleck zu versetzen. Die Boje ist ein gelber Stahlzylinder von 5 m Länge und 50 cm Durchmesser, an dem in 10 m Tiefe ein langer Sack aus groben Polyesteramaschen hängt, der mit Stahlringen offen gehalten wird. Dies ist der Treibanker, der die Boje in einer bestimmten Wassermasse festhält, damit wir sie verfolgen können. Während EisenEx hatten wir eine kugelförmige Boje verwendet, die auf den Wellen tanzte und dadurch einen so starken Zug auf den Treibanker ausübte, dass das Verbindungsseil riss und Instrumente verloren gingen. Diese Spierenboje ist tagsüber schwer zu sichten (nachts ist sie wegen des Blinklichts leicht erkennbar), weil die Wellen über sie hinwegziehen, aber, zusammen mit dem verstärkten Stahlrahmen und dem elastischen Verbindungsseil, hat sie den Stürmen bisher standgehalten.

Unterhalb des Treibankers sind Instrumente zur Messung der Strömung (ein ADCP) sowie des Sauerstoff- und Kohlendioxidgehaltes in der durchmischten Schicht angebracht. Weit unterhalb in 200 m Wassertiefe hängen 2 Sinkstofffallen, um Partikel, die aus unserer Blüte herabsinken, zu sammeln. Eine von diesen ist die üblicherweise verwendete Sorte mit 24 Sammelgläsern, die in 2-tägigen Intervallen unterhalb des Sammeltrichters rotieren und den

"Partikelregen" auffangen. Die quantitative Erfassung dieses "Regens" ist ebenso schwer wie die Messung des Schneefalls während eines Sturms, weil die Partikel sich horizontal viel schneller als vertikal bewegen. Die andere Falle ist eine Spezialkonstruktion, die das hydrodynamische Problem umgeht und eine quantitative Erfassung des Partikelregens liefern soll.

Alle bisherigen Kartierungen des Flecks mit Schiff und Hubschrauber haben gezeigt, dass er eine ovale Form hat und auf einer Seite schärfer abgegrenzt ist als auf der anderen. Die hohen Chlorophyllwerte, die das am wenigsten verdünnte Wasser anzeigen, befinden sich in einem "Hotspot" von ca. 10 km Breite dicht am scharfen Rand des Flecks. Die Akkumulationsraten des Planktons in diesem Hotspot kommen den wahren eisenbedingten Wachstumssraten am nächsten, so pflegen wir unsere "In-Station" dort zu platzieren. Der Fleck treibt ca. 2 – 3 km pro Stunde und die Durchführung der Station dauert ca. 10 Stunden, außerdem ist die Treibrichtung des Flecks unabhängig vom Wind, der aber das Schiff auch einige km/Std versetzt. Hinzu kommt, dass der gesamte Wirbel, wie aus den Altimeterbildern ersichtlich, sich zeitweilig ebenfalls viele Kilometer im ACC verlagert, um dann wieder stehenzubleiben. Im Hotspot zu verbleiben ist nicht einfach. Wie die Rote Königin zu Alice im Wunderland sagte: Du mußt laufen, um an derselben Stelle zu bleiben. Unsere Boje ist unser einziger Referenzpunkt, weil sie sich mit dem Hotspot bewegt, oder, wie wir während einer 60-stündigen Station im Hotspot feststellten, innerhalb dessen hin und her kreist. Das Schiff muss daher während der Stationen mehrmals zur Boje zurückfahren.

Um zur Geschichte der letzten Woche zurückzukehren: Bis wir die Instrumente der Boje versorgt hatten, waren wir durch den ständig steigenden Wind aus dem Hotspot vertrieben worden, so mussten wir die Stelle wieder suchen. Die Boje auszubringen ist ein kniffliges Unternehmen und erfordert einen Kran und die ganze Mannschaft. Es war schon dunkel geworden, die Wellen wurden wütender und wir wollten die Mannschaft nicht länger auf standby halten. So beschlossen wir, die Nacht mit der Suche des Hotspots mit FRRF und CO<sub>2</sub>-Gehalt zu verbringen. Am nächsten Morgen schafften wir es, die Boje trotz der hohen Wellen wieder in den Hotspot auszubringen. Danach dampften wir zum anderen Ende des rotierenden Wirbelkerns und, nachdem die FRRF-Werte gefallen und die CO<sub>2</sub>-Werte ordentlich gestiegen waren, führten wir dort eine "Außenstation" durch. Die nächsten Tage verbrachten wir mit der Vermessung des Flecks, indem wir auf derselben Linie hin- und herfuhren während der Fleck unter uns durchtrieb. Anhand der Strömungsgeschwindigkeiten errechneten wir eine Fläche von 260 km<sup>2</sup> mit höher als 2 mg Chl/m<sup>3</sup> innerhalb eines viel größeren Gebietes, in dem die Werte doppelt so hoch wie im umgebenden Wasser (0,5 mg/m<sup>3</sup>) lagen.

Die 60-stündige Station, die wir während des Wochenendes durchführten, war dem Studium von zeitlichen Schwankungen der physikalischen Umwelt sowie Tag/Nacht Rhythmen des Planktons und der Chemie der Wassersäule gewidmet. Die durchmischte Schicht war 100 m tief (die tiefste, die wir bisher im ACC gefunden haben), aber die 100 m Schicht darunter variierte erheblich.

Offensichtlich oszillierte diese Schicht auf Grund von internen Wellen, die zur Scherung und Durchmischung zwischen den Schichten führten und die für die ACC unüblichen hohen Chlorophyllwerte in Tiefen bis 150 m erklärten. Aber hinunter vermischte Algen müssen von hinunter gesunkenen unterschieden werden, und obwohl wachsendes Phytoplankton nicht sinkt, könnte ein Massensinken eingeleitet werden, wenn die Algen unter Eisenmangel zu leiden beginnen. Vertikale Durchmischung verschiedener Schichten findet im Mikroskalenbereich statt. So wird eine freifallende Sonde, die Mikrostrukturen bis 300 m Tiefe misst, eingesetzt, um die Vermischungsrate zu bestimmen. Die Erfassung der Energieübertragung vom Wind ins Wasser ist ein weiterer Aspekt von Interesse aber die Messungen sind mit einem Nachteil behaftet: Just wenn die Übertragung in stürmischen Phasen am stärksten ist, werden die Physiker, die die Sonde am Heck des Schiffs einsetzen, durch die Wellen, die über das Arbeitsdeck brechen, vertrieben.

Alle anderen Gruppen waren gleichermaßen an der Erfassung von Tagesgängen interessiert. Abgesehen von seiner treibenden Rolle bei der Photosynthese der Planktonalgen, die CO<sub>2</sub> und andere Nährstoffe aufnehmen, hat Licht eine unmittelbare Wirkung auf die Chemie vieler Moleküle einschließlich Eisen. Die Wachstumsraten der Algen werden mit neuen und konventionellen Methoden gemessen. Sowohl Bakterienaktivität als auch der Fraßdruck auf den Algen schwankt mit der Tageszeit. Proben dafür wurden alle 4 Stunden genommen. Insbesondere die großen Copepoden (moskitogroße Krebschen des Zooplanktons), verbringen den Tag in der Tiefe und schwimmen in der Nacht hinauf, um zu fressen. Deren Aktivität erzeugt CO<sub>2</sub> und hinterlässt abgegebene Stacheln (die großen Chaetoceros-Arten dominieren die Blüte) sowie Kot. Dieser sinkt entweder ab, oder wird von anderen kleineren Copepoden genutzt. Viele hundert Arten von Einzellern: Bakterien, Algen und Protozoen, zusammen mit vielen verschiedenen Sorten von Zooplanktern (wie Salpen und Copepoden) sind an unserer Blüte beteiligt. Alle diese Organismen leben nach vorgegebenen Mustern, die über Jahrmillionen evoluiert sind, und die wir mit unserem Experiment untersuchen. Die Gesamtsumme dieser Prozesse treibt die biogeochemischen Zyklen unseres Planeten von denen der Kohlenstoffkreislauf, vor allem der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre, mit dem Klima gekoppelt ist, zumindest auf geologischen Zeitskalen einschließlich der Eiszeitzyklen. Zu diesem Thema kehren wir später zurück.

Mit herzlichen Grüßen von einem Schiff, das sich anstrengt, die reiche Ernte einzubringen,

Victor Smetacek

Unsere Blüte hat ihren Höhepunkt letzte Woche erreicht und während dieser Woche hat ein Massenabsterben und Absinken der Populationen einiger dominanter Arten eingesetzt. Eisenmangel kann nicht der Grund gewesen sein, weil das zugeführte Eisen noch nicht verbraucht ist. Außerdem wachsen andere Arten weiter, so findet unter unseren Augen ein Wechsel der dominanten Arten statt. Wir wissen noch nicht, was diesen "Wachwechsel" ausgelöst hat. Dafür müssen wir erst die Verhältnisse in der Umgebung begutachten. Sind dort auch dieselben Arten abgestorben oder gedeihen sie noch? Morgen werden wir die letzte Station außerhalb der Blüte durchführen und sind sehr gespannt zu sehen, was uns dort erwartet.

Während der letzten Woche blieben die Chlorophyllkonzentrationen im Fleck bei 2,5 mg/m<sup>3</sup> stehen, trotz unvermindert hohen Produktionsraten von über 1,7 gC per m<sup>2</sup> und Tag und weiter abnehmenden CO<sub>2</sub> Konzentrationen im Wasser. Die Algen wuchsen weiter, aber die Zellzahl nahm nicht mehr zu. Die Silikatkonzentrationen hatten zwar um die Hälfte abgenommen, aber es war noch genug vorhanden. Die Nitrat- und Phosphatkonzentrationen hatten nur geringfügig abgenommen und waren noch sehr hoch. Offensichtlich wurde das Algenwachstum durch die Verluste der Zellen ausgeglichen.

Während der letzten Woche zeigten die Zellzahlen der verschiedenen Algenarten in 20 m Tiefe eine steile Abnahme der Zellen der häufigsten, großen Art – der robusten, langborstigen *Chaetoceros dictyota*. Das Verschwinden der Zellen konnte nur durch selektiven Wegfraß oder Absinken erklärt werden, da leere Schalen auch fehlten. Die anderen großen Arten derselben Gattung waren noch da, also war es unwahrscheinlich, dass die vielen Copepoden im Fleck nur die eine Art weggefressen hatten. Sie schienen die kleineren Arten der Gattung zu bevorzugen, weil diese Arten während des Experiments nicht zunahmten, trotz der sehr hohen Teilungsraten, die wir in Kulturen beobachteten. Also dominierten die großen, gut verteidigten Arten weiterhin unsere Blüte. Somit war ein rasches Absinken von *C. dictyota* Ketten aus der Deckschicht die einzige Erklärung für deren Verschwinden. Wir haben zwar reichlich Probenmaterial gesammelt, um diese Vermutung zu überprüfen und zu quantifizieren, aber diese werden erst später zu Hause bearbeitet. Es gibt aber andere Instrumente, um Absinkprozesse zu verfolgen.

An der CTD sind neben den Sonden zur Messung von Salzgehalt, Temperatur und Tiefe auch ein Fluorometer und Transmissometer angebracht. Das erste Gerät liefert eine grobe Abschätzung der Chlorophyllkonzentrationen und das zweite misst die Durchsichtigkeit des Wassers über die Abschwächung eines 25 cm langen Lichtstrahls. Je mehr Partikel im Wasser, desto schwächer der Strahl. Kleine, gleichmäßig verteilte Partikel hinterlassen eine glatte Linie, größere, unregelmäßige Partikel erzeugen Rauschen und einzelne, große Partikel wie Aggregate oder Copepoden ergeben Ausschläge, deren Länge von der Größe der Partikel abhängt. Die Profile dieser optischen Geräte zeigten deutlich die Entwicklung der Blüte und die Dominanz von großen

Arten. Sie zeigten auch, dass die 100 m tiefe Deckschicht in der Regel gut durchmischt war, abgesehen von den wenigen, ruhigen Tagen. Die Profile unterhalb von 100 m gingen nicht steil zurück, sondern nahmen bis etwa 150 m Tiefe allmählich ab. Darunter waren sie glatt und niedrig bis zum Grund. Mitte letzter Woche war ein verstärktes Auftreten von Zacken unterhalb von 150 m zu sehen, die wir auf absinkende Partikel aus der Schicht unmittelbar darüber zurückführten. Das Plankton in dieser Schicht war vor längerer Zeit in die Dunkelheit heruntergemischt worden, daher geschwächt und ab-sinkbere-it.

Wir hatten auch andere Aufgaben zu erledigen. Ein Raster wurde im Wirbelk-ern vermessen, um festzustellen, ob sich Copepoden im Fleck an-re-ichert. Danach wurden 2 Schnitte an den Wirbelrändern mit der Mikrostruk-tursonde durchgeführt, um Vermischungsprofile zu gewinnen. Wir hatten auch Besuch von 2 Robben während wir auf Station lagen. Die erste war so klein (ca. 1 m), dass wir sie zunächst für einen Pinguin hielten, auch weil sie in ähnlicher Weise aus dem Wasser sprang. Ans Schiff gelangt, legte sie sich auf den Rücken und schaute uns zu. Sie sah aus wie ein kleiner, verspielter Seehund und hatte offensichtlich Spaß daran, sich in den Wellen des Bugstrahlers zu tummeln. Sie schwamm in die Wellen hinein und ließ sich dann auf dem Rücken liegend wegdrücken, die Flossen auf dem Bauch gefaltet. Vielleicht wurde sie an die Brecher auf dem Strand ihrer Kindheit erinnert. Das putzige Tier unterhielt uns für mehrere Stunden und wäre am liebsten an Bord gekommen. Der zweite Besucher war eine Pelzrobbe, die uns kurz musterte und dann verschwand. Der Datenstrom von der Mikrostruktursonde riss plötzlich ab und als wir das Gerät wieder an Deck hatten, bemerkten wir, dass die Plastikummhüllung des Kabels durchgebissen war. Die Robbe hatte ihn wohl ausprobiert.

Die am Sonntag durchgeführte Station im Fleck war ein unvergessliches Erlebnis. Vor ein paar Tagen, als wir die Stelle für die Station suchten, bemerkten wir, dass der "hot spot" sich ausgedehnt hatte und die Boje am Rand driftete. Aber nun mussten wir eine Weile suchen bis wir das CO<sub>2</sub> Minimum fanden, das etwas höher als das vorige Mal lag. Wir hatten noch niedrigere Werte erwartet, also hatte sich die Wachstumsrate inzwischen verlangsamt. Die Daten vom FRRF machten uns perplex. Außerhalb des Flecks waren die Werte normal, aber innerhalb sprangen sie herum und waren häufig höher als das theoretische Maximum. Offensichtlich benahm sich das Phy-to-plankton eigenartig. Die Suche nach dem hot spot dauerte erheblich länger als geplant, aber endlich konnten wir mit der Station beginnen. Die erste CTD ging bis 500 m und wir beobachteten die Profile mit angehaltenem Atem. Als das Gerät unterhalb der durchmischten Tiefe sank, nahmen die Fluorom-e-ter- und Transmissometerprofile erwartungsgemäß ab, aber im Gegensatz zu den früheren glatten Profilen war das letztere stachelig wie ein Igelrücken bis in 500 m Tiefe. Die nächste CTD wurde bis 1000 m geschickt und zeigte das gleiche Bild bis unten. Das Fluoreszenzprofil war glatter aber es gab viele Ausschläge. Offensichtlich war eine Menge großer Partikel am Absinken. Es waren zu viele um die fehlenden C. dictyochaeta Ketten zu erklären.

Wir untersuchten eine lebende, angereicherte Planktonprobe im Mikroskop unter blauem Licht. Dieses Licht lässt Chlorophyll rot fluoreszieren und die Chloroplasten von gesunden Algen glühen rubinrot vor dem schwarzen Hintergrund. Die Probe war ein Dschungel von großen Diatomeen, aber als wir das blaue Licht einschalteten, in der Erwartung viele rote Punkte zu sehen, waren wir überrascht, weil die Zellen von nur wenigen Arten leuchteten. Die meisten, einschließlich aller übriggebliebenen Chaetoceros-Zellen waren dunkel. Wir hatten eine Blüte sterbender und toter Zellen vor uns. War dies programmierter Zelltod, wie in den Blättern vor dem Laubfall oder war eine virulente Krankheit am Wirken, die die meisten Arten dahingerafft hatte, aber andere verschonte? Die Zellen der Arten, die am meisten zum Diatomeen-schlamm im darunter liegenden Sediment beitragen – Fragilariopsis und Thalassiothrix – waren gesund und in Zellteilung begriffen, aber die meisten anderen Arten lagen im Sterben. Niemand an Bord hatte ein solches Massensterben bisher beobachtet, obwohl die Ergebnisse vom Massenabsinken von Algenblüten in zahlreichen Sinkstofffallen dokumentiert worden sind. Es handelt sich somit um einen natürlichen Vorgang, der binnen weniger Tage abläuft. Die CTD, die bis zum Boden in 3.500 m Tiefe geschickt wurde, zeigte ein ähnlich gezacktes Muster bis unten. Die Algenzellen waren nicht nur im schnellen Sterben begriffen, sie sanken auch mit außergewöhnlichen Raten von 500 m am Tag ab. Wir waren Zeugen eines Vorgangs von immenser geochemischer Bedeutung: Ein natürlicher Mechanismus mit dem der CO<sub>2</sub>-Gehalt der Atmosphäre und somit das Klima reguliert wird.

Wir müssen Samstagmittag das Gebiet verlassen, so werden wir die restliche Zeit intensiv nutzen, um möglichst viele Wassersäulen im Fleck zu untersuchen. Glücklicherweise ist kein Sturm im Anmarsch, nur die üblichen Winde von 7 bis 8 Windstärke, an die wir uns seit langem schon gewöhnt haben.

Herzliche Grüße von einem aufgeregten Schiff, dessen Ernte in die Tiefe verschwindet,  
Victor Smetacek

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 eisengedüngten 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 eisengedüngte 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

Weekly report no. 1 EIFEX ANT XXI/3 RV "Polarstern" 25th January 2004

RV "Polarstern" departed from Cape Town punctually at 8 pm on the 21st January with 96 persons on board of which 43 are crewmembers and 53 are involved with carrying out the scientific mission of this research cruise. The latter represent 14 institutes and 3 companies from 7 European countries and South Africa. It had been a hot day and we sailed into a glorious sunset watching the twinkling lights of Cape Town gradually merge with the starry sky. Everything had gone according to plan and even the weather has been in our favour all along so we are in excellent spirits. The first few days were spent unpacking the innumerable boxes and setting up the multifarious instruments that, thanks to the efficiency of the logistics department of the AWI, are all on board so everybody is happy and grateful. The aim of the cruise – the European Iron Fertilisation Experiment (EIFEX) – is to study the growth and demise of a phytoplankton bloom that we will induce by fertilising a patch of ocean some tens of kilometres in diameter with some tens of tonnes of iron sulphate. Our experiment will be the eighth in a series of similar experiments – 2 in the Equatorial Pacific, 3 in the Southern Ocean and 2 in the Subarctic Pacific – that have been carried out so far. Phytoplankton blooms were induced in all these experiments so we are convinced that the same will happen during EIFEX. In contrast to earlier experiments including our own EisenEx that we carried out 3 years ago, we now have 9 weeks, which is enough time to also study the fate of the bloom adequately.

We intend conducting the experiment in an eddy south of the Antarctic Polar Front which is located at about 50°S, because the silica concentrations to its north will be low at this time of the year. Our first task is to locate a promising eddy and map it in order to ascertain its suitability for the experiment. Satellite images of sea surface height reveal the presence and characteristics of eddies and we have been observing the eddy field south of Africa since December. There are several to choose from, so we decided to head for the closest one due south of Africa at about 51°S.

In order to gain an overview of the hydrographical field we commenced measurements at the position of the Subantarctic Front at 46°S which we reached at dawn of Saturday (Jan. 24). The station started with a vertical zooplankton net to calibrate the acoustic instruments with which we measure the populations of these tiny animals below the ship. The microstructure sonde, which measures the degree of layering of the surface layer, was deployed next, followed by a deep cast of the CTD rosette. This instrument is the backbone of our cruise: it records vertical profiles of salinity, temperature, chlorophyll fluorescence and turbidity and is equipped with 24 bottles of 12-litre capacity that can be closed at desired depths. The water samples are divided up amongst the chemists and biologists on board who measure various properties of the water including the organisms living in it. This CTD cast was used to calibrate the towed undulating instrument Scanfish that was deployed at the end of the station. Scanfish is towed behind the ship at a speed of about 15 km an hour. It undulates between the

surface and 220 m depth every few kms and so records the large-scale structure of the water masses in the study region.

After a day of satisfactory performance in calm seas we lost Scanfish because the wire snapped suddenly for unknown reasons. Scanfish is about 2 m long, buoyant and brilliant yellow so we searched for it with our helicopter but unfortunately to no avail. The wire had snapped some 150 m from the instrument so its weight more than sufficed to drag Scanfish down to the bottom. We are now continuing the southerly transect with CTD "dips" (i.e. no bottle sampling) down to 500 m every 5 miles. We will reach our eddy on Monday and by midweek will either have started fertilisation or moved to the next eddy.

Fertilisation experiments have received a lot of publicity because of their climate relevance, which will be dealt with in greater detail in later reports. Our overarching goal is to further our understanding of how open ocean ecosystems function and how the organisms of the plankton interact with one another and with the environment to drive the biogeochemical cycles of our planet.

The quality of the insights we will gain from this experiment can best be communicated with a science fiction story. Imagine an intelligent life form that evolved on a planet similar to ours but which was covered entirely with a single continuous ocean, just as Mars is covered by a single land mass. A hundred of these aliens visit planet Earth (just prior to the advent of humans) with the same motivation (and funding) that will be focussed on the manned Mars mission if President Bush has his way. Being aquatic organisms the aliens would "land" on the ocean in a space ship filled with water and find a familiar environment inhabited by organisms whose way of life and hence evolution they would soon understand. They would be baffled by the air-breathing marine animals (turtles, birds and mammals) but they would be totally bewildered (and presumably excited) by life on the continents.

Assume the aliens choose Africa as their study site and, since they would have invented propellers but not the wheel, use helicopters to explore its length and breadth. They would wonder at the patterns of forest, savannah, semi-desert and desert and after analysing their pictures and samples, formulate what for them would be a strange hypothesis: water evaporating from the ocean falling as rain on the continent determines its vegetation and life forms. How would they test this hypothesis? By sprinkling patches of land in the different regions with water, of course. They would get no response in the equatorial rain forests where it rains all the time anyway, but also none, at least for a long time, in the centre of the arid deserts where it never rains and there is no soil (meaning nutrients). The response would be strongest in the savannah, particularly if it happened to be the middle of the dry season. Within days the parched brown land would acquire a green sheen, and the grass would grow till it reached its maximum height and further irrigation would have no effect. However, in the meantime,

herds of herbivores (from elephants to antelopes) would move in from the surroundings and swarms of insects (from aphids to locusts) would proliferate, all grazing on the lush vegetation. The amount of vegetation surviving the onslaught of the grazers would depend on the size of the irrigated patch relative to the parched surroundings and the zoologist aliens would claim that the animals determine the amount of vegetation. The nutrient chemist aliens on the other hand would take another view and so on. But they would all have to agree that the supply of water is the primary factor determining how much life can be sustained in a particular terrestrial environment.

To come back to our own cruise: yes, we belong to the terrestrial aliens who have recently discovered that the supply of iron is the primary determinant of how much life can be sustained in the ocean. Dust whipped off the continents by winds supplies iron to the land- far open ocean and the productive regions receive more "iron rain" than the unproductive regions such as those around the ship. Our experiment will show us how the anemic plankton reacts to this "manna from heaven" and what the fate of the induced vegetation will be. The various teams on board covering different aspects of the plankton and its environment will be introduced in subsequent reports.

Polarstern is a secure life-supporting system and we are fortunate in that many members of the crew who looked after us so well during EisenEx are again on board. They are doing their best to make our stay profitable and comfortable. The food is delicious and all the more enjoyable because the winds have been calm so far. We would rather be here than on Mars. With our best wishes from the purring forties,

Victor Smetacek

Weekly report no. 2 EIFEX ANT XXI/3 RV "Polarstern" 2 February 2004

Monitors stand in all laboratories and gathering places on this fine ship that provide continuous updates on her position, speed and, amongst various other data, also the number of the station the ship is either currently occupying, or going to occupy next. A "station" is oceanographer jargon for whenever a ship stops to carry out measurements, collect samples or both. On "normal" cruises the ship makes bee lines between stations whose positions are fixed beforehand. But after finishing our first CTD transect, which showed no signs of an eddy, we did not know where the next station would be. For want of a number during the first half of last week, the captain wrote "Search for the eddy" in this box. We knew we were going to an eddy but we didn't know where it was. We hunted our quarry - an eddy of about 100 km diameter rotating in a clockwise direction - using sonar, the bat's and dolphin's organ of perception.

Polarstern's sense organ is the Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) which emits high-frequency sounds that bounce back from tiny particles of plankton drifting in the water below the ship. The ADCP analyses these echoes and is able to estimate the velocity of the layers in which they are located. The acoustic information is converted into arrows pointing in the direction of the current at that point. Their length indicates current speeds. A separate sheet is printed for each depth layer for 6 layers down to 300 m depth. If we crossed an eddy, the plots of ADCP tracks would show bundles of arrows of equal length pointing in opposite directions, either adjacent to each other if we cut the flank, or up to 100 km apart if we crossed its centre. In the latter case there would be short arrows in between representing the eddy's calmer centre.

We were aided in our search by satellite images of sea surface height provided by altimeters mounted on two satellites. The images depict variation in sea surface height of a few decimetres across many tens of kilometres. Eddies circling cold-water cores are about 20 -40 cm deeper in the middle than at the circumference because denser (colder) water occupies less volume than for the same weight of less dense (warmer) water. The colder the core water relative to its surroundings, the deeper the depression; conversely, eddies with warmer cores are raised in the centre by the same amount. Eddies arise when bands of fast currents meander into loops that eventually detach from the current which formed them and continue to spin on their own for a while, eventually slowing down and dissipating into the surrounding waters.

Why we need to grow our bloom in a clockwise eddy requires some background information on the properties of the Antarctic Circumpolar Current (ACC). This 1000 km broad ring of cold water, which encircles the continent and insulates its load of ice from the rest of the globe, is pushed eastward by the west wind belt. The ACC consists of several parallel, ca. 200 km broad bands of water that increase in temperature from south to north by about a degree per band and are separated by fast-flowing frontal jets of which the

Polar Front is the most prominent. These fronts meander either to the north or south and can hence shed eddies on either side. In doing so they transport water from one band into the other. The ACC surface waters are extremely rich in nutrients because they are being continuously replenished by deep water upwelling along its southern boundary. Whereas nitrate and phosphate concentrations remain high across the ACC, silica concentrations decrease markedly from north to south due to uptake by diatoms. By this time of the year, waters north of the Polar Front are depleted in silica. Since our bloom will be dominated by diatoms, we need to carry out the experiment in a silica-rich eddy containing colder water from south of the Polar Front. Such an eddy will be spinning in a clockwise direction.

Since our first southward transect to 52°S showed no signs of the eddy we had selected from the altimeter images, we decided to rely for a while only on the ADCP, as this would allow us to steam at 13 knots (about 20 km/h) without interruption. A diagonal track to the northeast again yielded only eastward currents, so we laid another transect to cut through the area between the two tracks and this time found a band of strong currents flowing southwest. As an adjacent band of currents was flowing in the opposite direction, the physicists conjectured that this could represent the "umbilical cord" of an eddy in the process of detachment. The younger they are, the longer they can last, so we decided to invest some time in finding out whether it fulfilled all our requirements.

We spent the next days mapping the eddy and its surroundings with a series of north-south ADCP transects interspersed every 12 miles with short CTD stations. The picture that emerged by the end of last week confirmed the earlier prediction of the physicists. This was a young eddy with an ellipsoid-shaped cold core 130 x 50 km in dimension extending well below 300m depth, clearly isolated from its surroundings and bounded to the north by the strong currents of the Polar Front. Silica concentrations were very high in the cold core indicating that this water mass had been dragged northward by the frontal jet south of the Polar Front. All the requirements were met, we had found our quarry. A cause for concern was the ellipsoidal shape which would gradually become rounded with time. What this would do to the fertilized patch was uncertain. One possibility was that the patch would be pulled out into a spiral and some of it might be lost to the surroundings. Pinpointing the area with the lowest current speeds and placing our patch on its centre seemed to be the safest course to ensure that our patch remained rounded. After a tight ADCP grid crisscrossing the surmised centre confirmed the most suitable site, we deployed a floating buoy attached to a drogue at 30 m depth and carried out our first full station of the cruise on Sunday afternoon. The station lasted till early Monday morning by which time the demands of all the groups on board had been met. Data collected during this station provide the initial conditions prior to fertilisation. We commenced fertilising the eddy's centre on early Monday morning.

While the physicists were busy mapping the eddy, the chemists and biologists had measured its surface properties and the distribution of plankton. High CO<sub>2</sub> and nutrient concentrations in the core indicated that not much biological activity had taken place in it. Iron concentrations were very low and so were those of phytoplankton (the unicellular algae comprising the plants of the plankton). The low chlorophyll concentrations (0.2 mg Chl./m<sup>3</sup>) in the cold core contrasted strongly with the much higher values in the Polar Front (1.2 mg Chl./m<sup>3</sup>). The frontal plankton had probably received a "shot of iron" in the recent past that had not reached their southern counterparts. The source of the iron is not known but it could have come from deeper water upwelling along the front, from dust settling locally in rain, or from melting icebergs. We had encountered 5 stately icebergs in the region and they are known sources of iron. One of the stations happened to be so close to an iceberg that one of the newcomers to the Southern Ocean asked if we had stopped the ship to let everybody appreciate its sweeping form, the breakers rushing up its smooth sides and its soft shades of grey, white and blue.

The weather has not been a problem so far; on the contrary, the stiff breeze blowing since a few days serves to ensure that the iron solution will be well mixed in the course of the next few days without inconveniencing anybody or restricting any activity. We have now entered the second lap of the cruise, and are looking forward to further developments. Trial flights of the helicopter-based LIDAR sensor which tracks chlorophyll concentrations have proven successful, so we are confident that we will be able to map the patch rapidly once the plankton start growing.

With our best wishes from an excited ship,  
Victor Smetacek

Weekly report no. 3 EIFEX ANT XXI/3 RV "Polarstern" 10 February 2004

The last week of January was spent mapping the eddy, finding its centre, measuring the initial conditions of the experiment and finally on early Monday morning (2nd February) we started fertilising the patch. We used the same procedure that had proved successful during our first experiment (EisenEx): Polarstern steamed at 8 km/hr along an outward spiralling track from the eddy centre while a weakly acidified, strong solution of ferrous (iron) sulphate was released into the ship's propeller wash. The spiral was 250 km long and its circles 1 km apart. By Tuesday morning we had fertilised a circular patch of 150 km<sup>2</sup> area and 14 km diameter. The cruise track appeared as a perfect spiral on the monitor: proof of the splendid job accomplished by the ship's navigators using the technique they had developed during EisenEx.

The amount of iron sulphate released was calculated to raise iron concentrations in the 80 m deep mixed layer from the very low values characteristic of the ACC to values typical for productive coastal regions (from 5 to 100 nanograms/litre). This was achieved with 6 tonnes of iron sulphate (we still have 20 tonnes in reserve) equivalent to 1 kg for 2 million cubic metres. This figure conveys an impression of the minute amounts of iron required to revive anemic plankton. We used the same iron sulphate powder sold by gardening shops to improve lawns which costs a few hundred Euros per tonne. The iron solution was prepared by 2 volunteers working in shifts in a container equipped with a large funnel which emptied into either of the two 10 m<sup>3</sup> tanks on the afterdeck. They wore plastic overalls and a gas mask to protect eyes and nose from the non-toxic but irritating powder. Each shift emptied 31 bags of 25 kg each washed down with sea water from the ship's fire hose into one of the tanks while the solution prepared previously in the other one was being released. A total of 9 tanks were filled and emptied.

The phytoplankton reacted immediately to the iron fertilisation by increasing the efficiency of their photosynthetic machinery: A bit like shifting gears in a car. This "fitness index" of algal cells is recorded continuously by an instrument that flashes nanosecond bursts of blue light at cells passing through a seawater intake pipe in the ship. The cells flash back "excess" light they absorbed but could not use, as a burst of red light which is measured by the instrument: a fast repetition rate fluorometer or FRRF) The more light the cells retain, the more efficiently their machinery is running. This chemical factory is run by tightly linked molecules of different functions including pigments, enzymes and transporters. Iron-bearing enzymes are involved in energy transfer within the molecular machinery. Their numbers are low during iron limitation but increase when iron becomes available. The more of them, the more light that can be processed. Further, the light-capturing, water-splitting molecule chlorophyll can only be made by enzymes containing iron, the more of these enzymes, the greener the cells become and the faster they can divide.

So far the FRRF had measured uniformly low values of this efficiency index (fv/fm between 0.28 and 0.32) everywhere, even where we had observed large quantities of healthy-looking, growing phytoplankton cells, particularly along the Polar Front. The phytoplankton in the eddy centre had the same low values and the few cells and short chains we found under the microscope also looked "wilted". Apparently the ACC phytoplankton were chugging along in first gear. While spinning our fertilisation circles the efficiency values along the western rim of our spiral jumped to over 0.4, the highest values we had recorded so far. The patch was spreading faster in this region, confirmed also by ADCP recordings and the drift path of a free-floating buoy we had deployed prior to fertilisation. The algae had shifted to second gear within hours of receiving their shot of iron. The algae in our patch had started to grow but the low number of seeding cells meant that even if they grew at their maximum rate, i.e. shifted to fourth gear, they would need 3 weeks to reach the levels already present in the Polar Front and another two weeks to reach the levels achieved by the EisenEx bloom in 3 weeks.

We had been eyeing the alternative eddy in the West, close to the Greenwich meridian at 2° E, all the while we were mapping this one at 18° E. It was a circular eddy which had formed in early December and resembled the al- time-ter images of the EisenEx eddy which had been such a success, because it stayed in position for at least 6 months and retained the rounded patch nicely in its centre. Since our patch would not take off before 3 weeks, a plan was hatched to steam to the 2° E eddy, examine its suitability with a few transects and if it passed the test we would fertilise it and stay there. If it did not, we would steam back to the first eddy and find our patch by using the FRRF. We did not expect to miss any fundamental insights in the first week or two of growth. The main incentive to shift eddies came from satellite images of chlorophyll in the ACC which clearly showed that the entire sector of the ACC to the west had concentrations similar to those present only along the Polar Front in our sector. The southern region from where our eddy core originated appeared ominously barren in the same images. If the eddy centre in the 2° E eddy was as green as indicated by the satellite, we would gain 2 weeks by conducting our experiment there, even if we fertilised a week later.

The decision was taken while fertilising the first eddy. A lengthy debate on the pros and cons of the plan based on the results of the first station in the eddy centre was carried out on Monday at the regular evening meeting that all attend. The advantage of our eddy was its youth and the stability of its centre, however, its low seeding stock of large diatoms capable of making the bloom (a tenth of that initially present in EisenEx) combined with a large population of hungry salps which filled the nets during the night hauls were its disadvantages.

Salps are peculiar, barrel-shaped, watery animals of 1 – 10 cm length that bear a vague resemblance to jelly fish although they belong to the vertebrate line, i.e. we share common ancestors in recent evolutionary

history. Salps swarm in the ACC and other low productive oceans because they use the same muscles to feed, swim and breathe simultaneously. This is an efficient way of living because it reduces construction costs and conserves energy. They pump large volumes of water through a fine-meshed sieve which collects plankton but serves also as a gill. The water is squeezed out, jet-like, at the end. They can swim 10 m in about a minute and migrate to the surface layer at night and spend the day at several 100 m depth. Salps seem to do best when phytoplankton concentrations are as low as in the patch. They multiply by growing a stalk and budding new individuals along it. In warmer waters several new, full-sized individuals can be produced per day and stalk. They would be the stuff of horror movies in the aquatic alien world. The salp sieves start clogging at higher plankton densities which must be a problem, as salps seem to avoid blooms. It is not known to what extent their formidable pumping and reproduction capacity contributes to keeping phytoplankton stocks low, but their abundance in the core would at least slow down bloom growth if not keep it in check altogether.

We decided to invest some time in inspecting the second eddy, so immediately after fertilising our patch, we steamed due west on Tuesday morning to its site, some 2 1/2 days away. Fate struck on the way in the form of two strong storms in short succession which buffeted the ship and prevented any work. To avoid further discomfort we steamed 350 km north to calmer waters and let the storms pass along the latitude of our eddies. The storms also crossed our patch two days later, so we would have had to escape north there as well. The storms cost us three days and on Monday morning we approached our eddy on a course aimed through its centre. Full of suspense, we watched the temperature and salinity values on the monitors and followed the results of the CO<sub>2</sub>, nutrient, chlorophyll and plankton measurements. The first relief came from regular observations of the phytoplankton under the microscope. As the ship plowed through the area of the eddy, we found lots of healthy looking diatoms. The other measurements confirmed the first impression. After completing the transect by the evening, the ADCP profiles indicated a band of strong, westward flowing currents where the southern border of the eddy was expected. The transect had indeed cut through an eddy! Further transects carried out during Tuesday indicated that we had located a distinct, albeit small eddy with a closed core of about 50 x 60 km. We decided to stay here and start with fertilisation on Wednesday. The novices were excited and impressed by the storms, but have since learned to cope with them as part of life in this remote region of the globe.

We send our greetings from a sturdy ship rocking and rolling along the boundary between the roaring forties and furious fifties,

Victor Smetacek

Weekly report no. 4 EIFEX (ANT XXI/3) RV "Polarstern" 16 February 2004

The mood of excitement and suspense mingled with impatience that pervaded the first few weeks of this cruise has now given way to the relaxed anticipation of things to come that cannot be pushed any further. We have shifted gears by moving from the uncertainties of the hunter, full of apprehension as to what the next bend of the front will reveal, to the fatalistic patience of the farmer, watching the crop developing in the painstakingly selected field over the course of the five weeks left to us.

It might seem strange that, in such a vast, seemingly homogeneous ocean, the areas suitable for our experiment are so vanishingly small and have to be sought with so much trouble. In fact, any patch of randomly selected water would do, because the phytoplankton is iron-limited across huge stretches of the ocean. The problem is to find a water mass which will retain its shape for the time scales of our experiment. The stretch of ACC sweeping through the Atlantic Sector is particularly dynamic and fast-flowing and even the bands of water with slower current speeds in between the frontal jets tend to be short-lived. Fertilising an undefined water mass can result in problems of which distortion of the patch into a long streak or break-up into several patches are the worst-case scenarios. Another potential problem is the local heterogeneity of plankton (patchiness), sometimes across kilometre-scales which can result in unequal development within the fertilised patch and cause difficulties in areal quantification of bulk processes. The core of a rotating, stationary eddy is the ideal container for the relatively small experimental patch we intend studying and is worth the trouble searching for, because it reduces these risks to a minimum. Another major advantage offered by an eddy core in the ACC is the coherence between surface and deeper layers. Particles sinking through the water column can hence be tracked quantitatively on their way down.

The decision to fertilise our new eddy was taken after assessing the results of several long ADCP transects that were completed by Tuesday last week. The physicists converted the diagrammes bristling with arrows pointing in various directions into smooth contour plots of stream functions which revealed a pear-shaped, closed eddy core of about 80 by 120 km extent and at least 500 m deep enclosed within a loop of strong currents. Silica concentrations measured in surface water along the transects beautifully confirmed the results of the current contours. Values inside the core were 19 micromoles/l but only 4 and 7 in the surrounding water to the north and south respectively; clearly the eddy core represented the silica-rich band of water in the south. The core centre could be surmised from the contours but had to be confirmed with a small-scale ADCP grid which was carried out through the night and into the next morning. Since this closed core had been rotating for at least a month the water inside it was expected to be homogenised by mixing. This was confirmed by measurements of the CO<sub>2</sub> and nutrient concentrations carried out during the small-scale grid. The constancy of the values over the large area covered re---

flected the superb analytical skills of the chemists on board.

The centre of the core was identified by Wednesday afternoon and the drift-ing buoy deployed in it. A long station with 6 CTD casts to fulfil the water demands of the various groups on board, interspersed with various other gear including zooplankton nets, was carried out next to the buoy through the night to record the initial conditions. The rough weather and heaving seas led to some delays so fertilisation was started at midday on Thursday and completed by Friday morning. The same procedure was used as in the fertilisation of the first eddy but this time the spiral was centred around the drifting buoy. A short station was carried out next in the centre of the fertilised patch for the physiologists to ascertain short-term responses by the organisms. This was followed by a longer station within the core but outside the iron patch which will serve as a reference station to compare the processes going on within the patch with those in outside water. The homogeneity of the core water will ensure that these reference or "control" stations will reflect what would have happened in the patch had it not been fertilised.

On Saturday we commenced mapping the hydrography of the eddy with a grid of stations 12 nautical miles (ca. 20 km) apart which will take us till the end of this week to complete. Normally, only one short CTD cast is taken at each station but when we cross the fertilised patch, more time will be invested in measuring chemical and biological processes. The transmitters on the buoy have shown that it has travelled in a curve – first southward and then westward – since its deployment. Clearly the clockwise rotating core and not the westerly winds determine its path. On Sunday night we passed close to it and were heartened by the high Fv/Fm values recorded by the FRRF – 0.45, well above levels surrounding the patch. The iron had taken effect and the algae have shifted gear but it will take about a week before the algal biomass doubles. This is because only some algal species will enter into a prolonged fast-growth phase. Some species will not react at all but most will respond favourably to fertilisation either by slow but steady growth or by short spurts of fast growth. To return to the analogy with terrestrial ecosystems: this region of the ocean can be compared with a semi-desert such as the Sahel zone. Most of the plants are adapted to desert conditions (cacti-like succulents) that will respond to the iron rain with a spurt of growth but it will be mostly the grasses that will turn the brown landscape green. And they will need some more time to make an impression. We are still guessing which species will be the "grasses" in our bloom.

The rotating core of this eddy had experienced much more biological ac-----  
tiv-i-ty in the recent past and hence carried a much larger stock of phyto-plank-ton than the first eddy. Chlorophyll concentrations ranged around 0.7 mg/m<sup>3</sup> most of which is in the large-celled phytoplankton that will contribute the bulk of the biomass once the bloom gets started. The first eddy was impoverished in these large species and would have taken at least several weeks to reach the concentrations prevailing here, possibly

even longer, given the nightly onslaughts of the hungry salps. These animals are also present here but the net catches indicate that they stay at the bottom of the phytoplankton rich layer which extends to about 100 m depth. Apparently, they prefer not to tangle with the spiny diatoms that dominate in the eddy core.

A glance through the microscope at an enriched sample of plankton from the eddy core reveals a rich variety of shapes dominated by the sweeping, pointed spines of some 10 species of the ubiquitous diatom genus *Chaetoceros* (which means carrier of spiny horns). The cells of this genus are rectangular and carry long, bristle-like spines at each end which extend outward many times the width of the cells. Some species are solitary but the cells of most are attached to one another in chains. The silica spines are hollow and in the larger species they are barbed and contain chloroplasts. Their function apparently is similar to that of thorns in land plants: they have evolved to keep grazers at bay but there are many grazers that have learned to cope with them. Salps do not seem to belong to the latter category. The spines also have another function in some species: at the end of the growth phase, when nutrients are exhausted, they become sticky and entangle with one another and with other cells to form snow-like flocs that sink rapidly through the water column. This behaviour is commonly observed in coastal blooms and some coastal species are present here, albeit in low numbers. There are many other species from different genera: some are needle-shaped, others resemble thick coins. We are eager to find out which species will dominate our bloom and how they manage to do so.

The weather has been trying all along, with wind speeds around 7 Beaufort during most of last week. We are grateful for the brief periods when the wind drops to 5 or 6 and the sea surface appears less frenzied. But at least we have not been hit by a storm since coming here and work and sleep are not disrupted by the constant heaving and occasional jolting that have become part of everyday life on board. Only Polarstern can offer this comfort in these seas.

With warm regards from the growling forties and wailing fifties,

Victor Smetacek

Weekly report no. 5 EIFEX (ANT XXI/3) RV "Polarstern" 23 February 2004

The big picture of the eddy, the rotating core of which is slowly greening, emerged slice by slice, in the course of the last week. The physicists laid a grid of 8 north-south transects between  $48^{\circ} 48'S$  and  $50^{\circ} 36'S$ , a distance of 108 nm (about 200 km), each with 10 stations 20 km apart. Three of the middle transects, also 20 km apart, cut through the core of the eddy. The transects on either side sliced through the loop of fast currents enclosing it and maintaining its identity. We were pressed for time: first, the survey had to be carried out as fast as possible for it to represent the dynamic flow field and second, we were eager to get back to our fertilised patch as soon as possible to follow what was going on in it. So at most stations the CTD was dipped to 500 m depth without closing any bottles as this takes much extra time. However, water column sampling and zooplankton net hauls were carried out at a few selected stations. The grid was completed at its north-eastern corner by Friday midnight and we steamed immediately thereafter to the site of the buoy, now in the southern part of the core, raring to carry out our first full, post-fertilisation station. We were hit by a bout of stormy weather on the way and since turning the ship in the heaving sea was unwise, we proceeded into the south-westerly wind, past the buoy and double tracked after the storm had abated. Our meteorologist predicted calmer weather ahead with wave heights that would permit carrying out station work by Sunday morning. So Sunday would be our big day.

The transmitters on the buoy traced a smooth oval path, 30 km x 50 km in the eight days since fertilising the 15 km circular patch around it. Two of the grid transects had passed close to the position of the buoy and each time the FRRF signalled vigorously growing plankton (indicated by the Fv/Fm index) albeit for less than a km in its vicinity. Clearly the buoy was no longer in the centre of the patch. These spikes of high values contrasted strongly with the monotonously constant, low values that prevailed everywhere else in the ACC. The second FRRF mounted on the CTD indicated that one of the stations of the grid was within the fertilised patch. High values extended uniformly down through the water column to over 90 m depth. Since we had released the iron solution into rough seas at the tail-end of two severe storms in short succession, the agitated water column had actively mixed the iron with the phytoplankton in the entire surface layer. "T'is an ill wind that blows nobody any good", so the storms had served a useful purpose. But they are a regular part of life here and indeed, before the decisive role of iron emerged from the recent 3 fertilisation experiments, the bad weather characteristic of this region (clouds, fog and deep, vigorous mixing coupled with low temperature) was blamed for the low productivity in these nutrient-rich waters.

We reached the buoy on Saturday evening and had the night to find the location, shape and centre of our patch where we wanted to carry out our long station. We knew the patch was close to the buoy but were not sure in which direction it lay, nor did we know how big it had grown in the past 8

days and whether it had remained compact or been pulled apart into a bundle of streaks by the swiftly rotating currents along the periphery of the core. Low cloud cover prevented helicopter reconnaissance flights as the laser beam which measures the fluorescence signal of chlorophyll in the water below is dimmed by low cloud or foggy conditions. In any case we were not expecting significantly higher chlorophyll concentrations so shortly after fertilisation. In these cold waters, phytoplankton grow at a leisurely pace.

The night was spent searching for the patch with the FRRF. The data, displayed on the ship's monitors for all to follow, appear as dots at one minute intervals along the cruise track in a colour code ranging from dark blue (0.3, the average low values here) to red (0.6, about the maximum value we expected). Both diagonal transects that had crossed close to the buoy showed streaky 10 km long stretches of alternating high and low values. It appeared likely that the patch was located to the north of the buoy, so after proceeding northeast for some distance, watching uniformly deep blue dots on the screen, we cut due west some 15 km north of the buoy. For a while we left behind a line of dark blue dots and then suddenly a pale blue followed by a green dot blipped on the screen, the patch was indeed to the north of the buoy! The line of green dots interspersed with yellow and oranges continued for 20 km and then flipped back, again abruptly, to the deep blue of anemic plankton. We now had to find out how far north the patch extended so we continued westward for some kilometres to make sure we were well outside the patch and then cut northeast to a point 15 km north of the centre of the east-west green and yellow stretch. Only deep blue dots appeared on this diagonal but when we turned south the same abrupt transition to green and yellow dots appeared some 10 km north of the east-west transect and continued for a 20 km stretch to the south. We had fortuitously laid a cross exactly through the patch centre and by 6 am we had delineated our patch to the southwest, traced its frayed edge towards the buoy in the southeast, and returned to the centre in time for the station to commence as planned before Sunday breakfast.

The station was more or less a duplicate of the pre-fertilisation station and lasted till late Sunday night. The rest of the night was spent mapping the north-eastern corner of the patch and at 6 am on Monday morning the reference station outside the patch was carried out to its north. Chlorophyll concentrations in the patch station were a uniform 1.6 mg/m<sup>3</sup> down to 90 m, well above the 0.7 mg/m<sup>3</sup> recorded in the surroundings, including the reference station. Values as high as 2.1 mg/m<sup>3</sup> measured by the chlorophyll group during the surface mapping of the patch was evidence of remarkably high growth rates in the past week. A glance through the microscope at a plankton sample from the station indicated that all the dominant species were growing faster than before but some species were growing even faster. This was evident from the number of dividing cells and the lengths of the chains. Where 4-celled chains had been the average, we now found many chains that had over 20 cells, the record being a small *Chaetoceros* species with up to 30 cells. The difference in size between

this small species (*C. curvisetus*) and the giant ones of the same genus mentioned in the previous report is equivalent to that between a small bush and a big tree. But here the analogy with land plants stops, because on land, the bigger plants overgrow the smaller ones and eventually deprive them of light. In the water, however, all the algal cells move with the medium in which they are suspended. So only fast-growing species can overshadow the others, regardless of size. Indeed, the smaller the cells, the faster they can divide.

The moving water provides both light and nutrients, so all the cells have to do is grow till their resources, meaning nutrients, are exhausted. Unlike land plants, phytoplankton do not require building material to make complex structures so about half their weight is protein, the same ratio common to animals in general. The amount of biomass the algae can accumulate depends on the amount of nutrients available. If all the nitrate and phosphate (which are the limiting nutrients in iron-rich ocean margins) present in the patch water were converted into diatom cells the chlorophyll concentrations would reach 60 mg/m<sup>3</sup>. Incoming light would be soaked up within the first few metres and the interior of the mixed layer would be darker than the floor of a dense forest. Our bloom will be much more modest but this calculation gives some impression of the productive capacity of these waters, to which we will return later.

The mood is good and one is greeted by smiles and a lot of laughter in the laboratories, canteens and meeting rooms. The sense of a common mission is strong. The regular evening meetings are attended by all. The weather report is followed by a summary of the day's doings and results and, if there are not too many of the latter, background talks are given by the scientists. Technical matters are also dealt with and rumours last only a few hours. The captain, the officers not on duty and the ship's doctor also attend the meetings and seem to be fascinated by what we are doing and how we are doing it: Guiding the ship with ADCP and then FRRF, changing locations after looking through a microscope, all the while extracting information on the life under us from chains of numbers produced by a bazaar of instruments. We are excited by our findings and grateful that luck has been on our side, so far.

With our best wishes, from a busy ship, working hard before the approaching storm hits us,

Victor Smetacek

Weekly report no. 6 EIFEX (ANT XXI/3) RV "Polarstern" 1 March 2004

This has been our fifth week of life on the Antarctic Circumpolar Current (ACC), one of the least attractive places for human beings on earth. There are no fishing vessels and even the brand of extreme tourists seeking hardship challenges don't think of spending two months here. The ship is always heaving in a sea churned by the steady, strong westerly winds. The air has the same temperature as the sea which has risen in our patch from 4.0° to 4.5°C in the past two weeks of this late southern summer. The sea around us and the clouds above are grey and colourful sunsets so rare that they are announced from the bridge and even the officer on watch takes pictures. So there must be good reason for so many of us to choose to work in such inhospitable surroundings. The reason is simple, the ACC is a scientific El Dorado. Its crucial role in the global heat budget has been known for some time but consensus is slowly emerging that its biota also play a key role in the global climate machinery. The issue revolves around how productive the ACC was during glacial periods. Our experiment is already providing data, to which we will return later, showing how this might have happened.

Last week was spent carrying out long stations within and outside the fertilised patch with attempts to map its extent in between. We found that it covers an area of about 20 x 30 km slightly off the core centre but including it. The patch has two regions with chlorophyll concentrations above 2 mg/m<sup>3</sup>. Values in the rest of the patch are lower but more than double those in the surrounding water. After the first mapping we picked up the buoy and replaced it, this time equipped with a range of instruments recording various parameters and two sediment traps, in the larger area of higher productivity. During the long station carried out next to the buoy, we watched it move steadily to the south and were greatly relieved a day later when it started moving to the west. It is currently on its way north within the eddy.

Because of dilution of the patch by areal extension and the fact that the phytoplankton had already consumed much of the iron, we decided to refertilise the entire patch. We did this by starting at the southern rim and zigzagging northward at intervals of 2 km. Each time we stopped fertilising when the eastern and western borders of the patch were reached. The day before fertilisation had been exceptionally calm and sunny and the values measured by the FRRF were lower than they had been before. The algae of the surface layer had evidently suffered sunburn and had not yet repaired the damage sustained by excessive UV light. Luckily we had another property – the CO<sub>2</sub> concentration of surface water – to guide the ship as the data flow was similar to that of the FRRF. Values prior to fertilisation had been homogeneous, so the presence of the patch was now signalled by lower values due to uptake by the growing algae. We released another 7 tonnes of iron sulfate, this time over an area of about 400 km<sup>2</sup> two weeks after the first fertilisation of the initial 150 km<sup>2</sup> area. To return to the rationale underlying our experiment. The ACC occupies the

same latitude as northern Europe (our patch is closer to the equator than Bremerhaven) so it receives the same amount of sunlight as the productive North Sea and coastal Norwegian waters. Indeed, where the iron-impoverished ACC waters come into contact with land masses, in particular the tip of the Antarctic Peninsula, productivity is phenomenally high. The stocks of great whales prior to their decimation by whaling are estimated to have eaten 200 Million tonnes of krill (the shrimp-like zooplankton that thrives on diatoms) annually, from an area not larger than 5 Mill. km<sup>2</sup>. For comparison, the total annual fish catch from the entire ocean has been stagnant at 70 Mill. tonnes for decades. The krill harvest is equivalent to 1 kg of shrimps per 4 m<sup>2</sup>. Imagine that many grasshoppers on an equivalent area of meadow and you have an impression of the enormous productivity potential lurking in ACC waters. Indeed the aquatic aliens will be wondering why land ecosystems have so much more plant but so much less animal biomass than aquatic systems. This is because: phytoplankton have much the same composition as animal biomass, so the transfer efficiency is much greater than in land plants with their huge cellulose load. This also explains the phenomenal growth rates of the Blue Whales, the largest animal the world has ever seen. To grow from fertilised egg to adult whale of more than 70 tonnes takes only four years! So why are there still so few blue whales? Evidence has been accumulating over the years that the krill stock size has, paradoxically, been decreasing ever since the whale stocks were decimated. Possibly the whale-krill food chain recycled nutrients, i.e. iron more effectively than its replacement. Research carried out in the thirties at the height of the whaling, recorded enormous diatom stocks in the productive areas which appear to have been more intensive and also extensive than those reported today. Despite their intense utilisation by zooplankton, a substantial portion of the bloom biomass settled out of the surface layer, evidenced by the high carbon content of the underlying sediments. Are we witnessing the creeping collapse of a spectacular ecosystem? The aquatic aliens' remedy to bring the whales back from the brink of extinction would be to fertilise their former feeding grounds. A few 100,000 tonnes of iron would be required and the only costs involved would be to ship it there and release it in an adequate manner in appropriate regions. A single ice-strengthened oil tanker plying back and forth annually would do the job. This option has not been considered to date but should now be given serious attention at an international level.

The diatoms of the iron-enriched waters sustaining the whales and all the other teeming animal life are quite different to those around us here. They are more similar to coastal plankton from other parts of the world. Wild life lovers have not yet discovered plankton, but when they do, the iron-limited ACC will become a magnet for them. It boasts the largest number of endemic species (that are not found anywhere else) and some of these are the largest and with their curving spines, the most flamboyant diatoms in the world. The several thousand scientists worldwide who study phytoplankton fall into two tribes. The taxonomists go to great pains to study individual cells under the microscope and differentiate them into species but they do not study them in their natural surroundings. The

biogeochemical tribe goes to sea but subjects the phytoplankton only to chemical and biophysical (e.g. FRRF) analyses to estimate their constituent molecules and elements particularly carbon, nitrogen and silica, and their growth rates. Species are not even looked at. This tribe attempts to estimate the contribution of bacteria and phytoplankton to global budgets of these elements. That such tiny organisms can be of global significance is because their individually insignificant doings, multiplied by their numbers, which put even astronomical figures in the shade (there are 10<sup>30</sup> plankton cells in the ocean but only about 10<sup>20</sup> stars in the entire universe), add up to Gigatonnes (10<sup>9</sup> tonnes).

On this ship are the beginnings of a new tribe of phytoplankton ecologists who are studying the individual species with loving care, counting their numbers and watching them growing and being grazed in the patch. They have found that the smaller, thin-shelled species are growing faster than the giant ones mentioned previously that indulge in extravagant use of silica. The group is also painstakingly isolating individual chains under a microscope for later genetic analyses to find how diverse the species populations are and what traits they have to enable such fast growth. The smaller species are the same that make the blooms in the whale feeding grounds, but since they started from much fewer seeding cells, the giants are still clearly dominating. Given enough time and iron the smaller cells will take over the bloom like the grasses in the semi-desert mentioned previously. It is only the cacti-like giants that require excessive amounts of silica. The blooms on the whale feeding grounds require much less, so silica only becomes limiting along the Polar Front, the realm of the giant diatoms which are favoured because the smaller, less protected diatoms are grazed faster than they can multiply under iron-limited conditions. So our results are confirming the hypothesis posed at the end of EisenEx. Iron fertilisation in the open ocean eventually results in establishment of coastal conditions. More about this and other exciting results in the next report.

With our best wishes from a ship reaping a rich harvest of data from the growing bloom,

Victor Smetacek

Weekly report no. 7 EIFEX (ANT XXI/3) RV "Polarstern" 8 March 2004

The last report conveyed a rather dreary picture of the ACC as a vast, stormy greyness and this is indeed what one sees through the bull-eyes or when one is hurrying about one's business on deck. But there is plenty for the eye to enjoy if one takes a few minutes off and rests them on the restless sea surface. The everchanging patterns of surging swell, breaking white caps and streaking foam capture the eye the way the flames of a lively fire do. Under foggy skies the breaking waves are a deep steel-grey tinged with blue along their tips, but when the sun is shining and the ocean calm, all one sees are shades of Mediterranean blue relieved only by the shining white of clouds on the horizon (the next depression). Had the sky been clear these last few days, we would have noticed that the sea is no longer the clear blue it once was but has acquired a turquoise tinge. Our bloom has grown sufficiently to change the colour of the water. Chloro-phyll concentrations above 2.5 mg/m<sup>3</sup> extend down to 100 m depth and even at 150 m the values in some CTD casts are as high as in the unfertilised surface water around the patch (0.5 mg/m<sup>3</sup>). If one were to condense the plankton in our bloom into a 10 m layer, the average depth of the summer surface layer in coastal waters, the sea around us would be a murky brown, murkier than the North Sea at the height of the spring bloom. The highest chlorophyll values recorded so far is 2.9 mg/m<sup>3</sup>.

By about the middle of last week the buoy had completed another closed oval within the eddy, almost identical to the first, and was again hovering at the southeastern corner where the eddy is open and the danger of losing it to the Polar Front is greatest. Since the time had come to service the instruments, we retrieved the buoy hoping to replace it in the westward flowing patch water within a few hours. The buoy is a yellow steel cylinder 5 m long and 50 cm in diameter to which is attached, some 10 m below, a long bag of coarse polyester mesh kept open by steel hoops. This is the drogue whose function is to "anchor" the buoy in a specific water mass of the surface layer for us to follow. During EisenEx we had used a spherical buoy which danced on top of the waves and tugged so much on the drogue that the strong rope snapped and we lost the drogue with the instruments below it. The spar buoy we are using now is more difficult to spot in the daytime (at night a flashing light renders it conspicuous) because the waves go over it, but, together with the strengthened steel frame of the drogue and the elastic rope with which it is now secured to the buoy, it has weathered the storms, so far.

Below the drogue are an ADCP to record current speeds and instruments that continuously measure oxygen and carbon dioxide in the mixed-layer water. Far below, at about 200 m depth, are located two sediment traps to collect the particles sinking out of our bloom. One is of standard design and has 24 cups that rotate at intervals of 2 days under the collecting funnel, thus obtaining a time course of the particle rain. However, estimating the amount of this "rain" through the water column quantitatively is as difficult as measuring snowfall during a blizzard because the sinking par-

particles move horizontally much faster than vertically. The other trap is specially designed to overcome this hydrodynamic problem and is expected to provide an accurate estimate of the amount of particles sinking through the water column.

All the various mappings of the patch by ship and helicopter indicate that it is fairly sharply delineated at one end but much more diffuse on the other side. The high chlorophyll values which represent the least diluted region, are concentrated in a "hot-spot" about 10 km wide close to the region of sharp demarcation of the patch. The accumulation rate of plankton in this hot-spot is the closest one can get to the true growth rates resulting from fertilisation so we carry out our "in stations" inside it. This hot-spot has an average drift of 2 - 3 km an hour and the station takes about 10 hrs to complete, besides, the direction of the patch is independent of the wind which, however, pushes the ship a few km/hr during the station. Besides, the altimeter images sent to us indicate that the eddy itself moves many tens of km, carrying its core with it, over a few days and then stays put for a while. So staying in the hot spot is quite a problem. As the Red Queen told Alice in Wonderland: You have to run to stay in the same spot. And the buoy is our only point of reference as it moves with the hot-spot or at least, as we found out during the 60-hour station carried out over the weekend, weaves around inside it. The ship has to move back to the buoy ever so often during stations.

To return to the story of mid-week, by the time the buoy had been serviced, the ship had been buffeted out of the hot spot by the steadily increasing wind so we had to steam around to find it again. Deploying the buoy is a tricky business and requires all deck hands and a crane to accomplish. Darkness was settling, the white caps were surging ever higher and we could not keep the people on standby for too long so we broke off the exercise and spent the night locating the hot-spot with the FRRF and CO<sub>2</sub> values. The buoy was deployed in the middle of the hot-spot from the heaving ship the next morning. After that we steamed to the opposite end of the rotating core and, when FRRF values dropped and CO<sub>2</sub> values rose, carried out our "out station". The next few days were spent mapping the region around the hot-spot simply by steaming back and forth along the same track with short CTD stations and letting the current carry it through our line of interception. The hot-spot with chlorophyll values above 2 mg/m<sup>3</sup> was about 260 km<sup>2</sup> but around it was a much vaster area where values were about double those recorded prior to fertilisation and still characteristic of unfertilised water.

The 60-hour station carried out over the weekend was devoted to studying temporal changes in the physical environment and diurnal rhythms in the plankton and chemistry of the water column. The mixed layer was generally 100 m deep (the deepest we have ever seen in the ACC) but the 100 m layer beneath it seemed to vary much more. Apparently internal waves were causing it to oscillate resulting in shear and mixing between the layers which would explain the high chlorophyll values below 100 m, sometimes as far

down as 150 m which are also very unusual for the ACC. But mixing down has to be differentiated from sinking down and, although phytoplankton in growing blooms don't normally sink, mass sinking might start when the bloom enters the iron-limited phase. Vertical mixing of different layers occurs at the microscale, so a free-falling instrument that measures micro-scale structure in the water column down to 300 m is used to estimate mixing rates. Measuring the rates of transfer of wind energy to the water and its eventual dissipation by mixing is another topic of interest with one draw--back: Most unfortunately, just when the transfer is greatest during storms, the physicists have to retreat from the site of deployment at the back of the ship because of the waves which come crashing over the deck.

All the other groups were equally interested in recording daily cycles. Light directly influences the chemistry of various molecules and also iron (to which we shall return in a later report), apart from driving the photo-synthesis of phytoplankton which take up CO<sub>2</sub> and other nutrients. Their growth rates are estimated by various methods both new and conventional. Bacterial activity as well as grazing pressure on the algae also varies over the day/night cycle. In particular, the larger copepods (mosquito-sized crustacea of the zooplankton) which are major grazers of diatoms, spend the day at depth and come up in the night to graze. Their activity releases CO<sub>2</sub> and presumably litters the surface layer with bitten off spines (the giant Chaetoceros are clearly dominating the bloom) and faecal pellets. These either sink out or are utilised by other copepods which feed on them. There are many hundreds of species of unicellular organisms: bacteria, phytoplankton and protozoa that, together with many different kinds of animals of the zooplankton (such as salps and copepods), are involved in our bloom. All these organisms live their daily lives according to a style or technique that evolved over millions of years and which we are investigating with our experiment. The sum total of these processes drives the biogeochemical cycles of the earth of which the carbon cycle, in terms of atmospheric CO<sub>2</sub>, is linked to global climate, at least at geological time scales, including the shorter scales of the ice-age cycle. To this topic we shall return later.

With warm regards from a ship reaping as rich a harvest as human endurance will allow,

Victor Smetacek

Weekly report no. 8 EIFEX (ANT XXI/3) RV "Polarstern" 16 March 2004

Our bloom reached its peak last week and this week is witnessing the demise and sinking of several of the dominant species that had contributed to its biomass. Iron concentrations in the bloom are still fairly high, so iron limitation is not responsible. Besides, other species are continuing to grow healthily, so what is happening is a replacement of the dominant species by others. But we do not yet know what is causing this "changing of the guard". We first need to find out what is going on outside the fertilised patch. Have the same species died there as well or are they still thriving? We will be doing the last outside station tomorrow and are eagerly looking forward to it.

During the last week, chlorophyll concentrations remained at about 2.5 mg/m<sup>3</sup> inside the hot spot although daily production rates were as high as ever at 1.7 g C per m<sup>2</sup> and day and CO<sub>2</sub> concentrations continued to decline. This indicated that new growth was occurring at the same rate even though diatom biomass was no longer accumulating. Silicate concentrations were reduced to half the initial values but there was still plenty for diatom growth. Nitrate and phosphate concentrations had declined only slightly, because they had been high from the start. So the bloom was growing but its size was not increasing.

The cell counts of diatom species under the microscope from 20 m depth showed a steep decline in numbers of the most abundant big species, the robust, long-spined *Chaetoceros dichchaeta*, over the previous week. Its disappearance could only be explained by selective feeding or sinking because empty cells were also missing. The several other big species of the genus were still there, so it seemed unlikely that the large numbers of copepods in the patch would feed on only a single species. Their grazing seemed to be concentrated on smaller species of *Chaetoceros*— the "grass" we had expected to overgrow the bloom — because their numbers did not increase despite high growth rates observed in culture experiments. So the big-celled, heavily defended diatoms continued to dominate. The only explanation for the disappearance of *C. dichchaeta* was that the cells had sunk out of the 100 m deep mixed layer. Analysis of the many samples collected from many depths will bring clarity later. For now data from other instruments provide a plausible picture of what actually happened.

On the CTD (conductivity (salinity), temperature and depth) are also mounted a fluorometer and a transmissometer that provide a stream of data that appear as continuous profiles together with the other parameters on the monitor while the instrument is being lowered and raised through the water column. The former provides a rough estimate of the chlorophyll concentration and the transmissometer indicates the turbidity of the water by measuring the intensity of a light beam of 25 cm length. The more particles in the water, the less light gets through. Small, evenly distributed particles leave a smooth trace, large, inhomogeneously distributed particles look noisy, whereas single very large particles, such as a large

aggregate or a copepod, leave a single blip whose length depends on the size of the particle. The profiles of these optical instruments clearly showed the development of the bloom and its dominance by large-celled phytoplankton. They also showed that the upper 100 m were generally well mixed (except in the brief periods of calm seas). The profiles below this depth did not drop off sharply but declined gradually down to 150 m, below which they were smooth all the way down to the bottom. It was in this intermediate layer that we first noticed an increasing number of blips signalling that aggregated particles were sinking out and assumed that they came from phytoplankton chains that had been mixed down below the surface layer. As these algae had been trapped in the dark for some time their buoyancy would have declined resulting in their sinking out.

But we also had other work to do. A grid was carried out across the core and the patch to assess the distribution of zooplankton in order to find out whether they were congregating within the patch. This was followed by sections across the boundaries of the core with the microstructure sonde to obtain profiles of mixing rates. Two different seals made separate visits to the ship. The first was only 1 m long and mistaken for a penguin because it jumped out of the water several times like a porpoise (penguins also do this) while approaching us. It then lay on its back to inspect the ship. It looked like a very young, still playful harbour seal and seemed to enjoy itself cavorting in the waves made by the side thrusters that are used to position the ship while at station. It swam in when the thrusters were switched on and then let itself be pushed out on its back, with flippers folded over the belly. Perhaps it was reminded of the breakers on the beach of its childhood. It entertained us for several hours and would have come on board if possible. We wondered from where such a young animal had come and where it was going all by itself and what it was feeding on in these fishless waters: It seemed happy and healthy and in an exploring mood. The other visitor was a fur seal which inspected us briefly and then swam off. It was dusk and we were completing the last profiles of the day with the free-falling sonde. The data stream was suddenly interrupted, so we hauled in the instrument and found that the plastic covered attachment cable was damaged. Closer inspection revealed clear bite marks that cut through the insulating plastic and flooded 200 m of the cable with water. The seal had evidently sampled the cable before leaving.

The in-patch station occupied on Sunday was an unforgettable experience. The station prior to it indicated that the hot spot had expanded and that the buoy had drifted to its downstream edge in the course of the one-and-a-half rounds it had completed since deployment. But now we had to search around for some time before we located the CO<sub>2</sub> minimum which was a bit higher than 3 days ago. We were expecting even lower values, so the growth rate had declined. The data from the FRRF were perplexing. The instrument performed well outside the patch, but values inside it jumped around with many higher than the theoretical maximum. Clearly the phytoplankton was behaving peculiarly. We finally carried out the station in the CO<sub>2</sub> minimum two hours later than planned. The first CTD went down to 500 m and we

watched the profiles on the screen while it was going down with bated breath. As the instrument sank below the mixed layer, the fluorescence and turbidity profiles declined as they should but in contrast to the earlier smooth lines the turbidity profile was as spiky as a hedgehog's back all the way down to 500 m. The next CTD went down to 1000 m and showed the same phenomenon all the way. The fluorescence profile was smoother but there were more blips at depth than before. Clearly, a lot of large particles were sinking out rapidly. There were too many to be just the missing *C. dictyota* chains.

We examined a live plankton sample collected with a hand net under blue light in the microscope. This light causes chlorophyll to fluoresce bright red and chloroplasts of healthy algae glow ruby-like against the black background. The sample was a jungle of giant diatoms but when we switched on the blue light expecting to see ruby spots everywhere, we were surprised to see that the cells of only a few species were fluorescing. The others, including all the remaining *Chaetoceros* species, were dark. We were looking at a bloom of dead and dying cells. Was this mass cell death programmed as in the leaves of trees before they are shed, or were we witnessing some virulent disease killing off some species and sparing others? The cells of the two species which contribute most to the diatom ooze in the underlying sediments – *Fragilariopsis* and *Thalassiothrix* – were healthy and flour---ish--ing but most of the other species were dying. None of us had witnessed anything like this before. The CTD which went down to the bottom showed that the spikes extended all the way to 3,500 m depth. The algal cells were not only dying fast but also sinking at extraordinarily high rates of more than 500 m a day. We were witnessing an event of immense geochemical significance: one of Nature's mechanisms to regulate CO<sub>2</sub> in the atmosphere and ultimately global climate.

We have to leave on Saturday midday so we are using the remaining time to sample as many water columns in and around the patch as possible. The weather forecast indicates no storms around the corner, just the usual wind force around 7 with occasional 8s. We are lucky.

Best wishes from an exhausted but excited ship watching its harvest sink into the deep,  
Victor Smetacek

Weekly report no. 9 EIFEX (ANT XXI/3) RV „Polarstern“ 22 March 2004

What an exciting and rewarding experiment this has been! The search for a suitable eddy, the bold decision to try out the second one, the toil of fertilising the plankton, the anxiety and the patience involved in locating the rotating patch and finding its hot spot, the exhausting, long stations, the heaving ship that kept us from our much deserved sleep, crowned finally by the satisfaction of seeing our „crop“ sink out into the briny deep. We all worked to the limits of exhaustion supported by a crew that fulfilled every wish as it arose. It has all worked out perfectly and we are leaving our patch without regrets. We could not have achieved more and are satisfied. What a wonderful feeling!

EIFEX was the first experiment that was able to study the fate of an iron-fertilised bloom in detail. The rate at which the diatom chains from our bloom sank through the water column exceeded our expectations by far. We had concentrated our efforts on the upper 500 – 1,000 m layer and had planned to take only 5 CTD profiles down to the bottom during the entire cruise to determine the deep structure of our eddy, but last week the CTD went down to the bottom at 3,800 m depth many times, taking profiles of the sinking diatom aggregates as they traversed the deep water column. The last cast was devoted to the layer just above the bottom after we noticed how much the turbidity had increased in it since the experiment was started. Microscopic examination of an enriched water sample from 15 m above the bottom revealed innumerable chains and cells of the diatoms from our bloom. We knew they were from our bloom because their filigree structure and long, pointed spines were still in perfect condition. As these dissolve within a few weeks we were looking at very fresh material, yet untouched by zooplankton. There also were the missing Chaetoceros from our bloom, together with many cells of other thin-walled species. Most were empty but some still had cell contents although these were generally disintegrated. The flow cytometer – an instrument that counts and measures particles flowing past a laser beam – even found fluorescing cells, i.e., some still contained chlorophyll.

Together with the intact chains and cells was also debris of crushed diatom shells loosely adhering to one another that clearly represented material that had gone through the guts of zooplankton. The sinking chains must have aggregated with this broken-up faecal material during their descent and dragged their particle load into the deep. Prior to this event thorium measurements in the bloom, which provide an estimate of the amount of particles sinking out from the mixed layer, indicated that no losses were occurring. So the faecal material produced by the grazing zooplankton was being retained. However, once the mass sinking commenced, some of the detritus accumulating in the mixed layer, possibly in the form of loose flocks, went down with the diatoms. In short, although the particle rain consisted mostly of silica cell walls, some carbon had been transferred to the deep as well. The amount involved will be determined later at home.

The last station outside our patch showed that the same process we had observed in our bloom had occurred here as well but at a much smaller magnitude. The populations of *Chaetoceros* species that had dominated the phytoplankton till recently were gone here as well and the same species as in our bloom now dominated the sparse phytoplankton assemblage. There were also blips in the transmissometer profile showing more particles in the deep-water column than before, but this drizzle was nothing like the heavy snowfall under our bloom. So the mass mortality and sinking out of almost all the *Chaetoceros* and many other thin-walled species also occurred outside our fertilised patch. But because there was more biomass, the rainfall was heavier. Although the causes of mortality are not yet known, the phenomenon was clearly part of the replacement of species typical of planktonic (pelagic) ecosystems everywhere, from lakes to the open ocean. This seasonal species succession has been known for over 150 years but the driving forces and the evolutionary advantages accruing to the species have not yet been satisfactorily explained. It is interdisciplinary experiments like ours that will shed light on this age-old problem because it can only be understood in the larger context of environmental factors that control the growth rate of the algae (light, iron, nutrients etc.) and the depressions of pathogens, parasites and grazers that control the mortality rates of the different species.

Another factor that results in the fallout of empty cells in diatoms is sex. This is because cell division in diatoms results in decreasing size of daughter cells. At a certain size, a sexual phase is initiated and the cell contents are converted into gametes (many sperms but one egg per cell) which leave behind empty cell walls. The fertilised egg then expands and attains the maximum size for that species before making a new cell wall, after which the cycle of vegetative cell division is repeated. The flamboyant *Corethron* with its crowns of long spines radiating out like the spokes of an open umbrella, is a particularly sexy species because its size reduces rapidly with each division. Many empty half-cells of this species were present in the bottom-near layer, indicating that the species had entered a mass sexual phase in the bloom and contributed to the fall out of silica from the surface layer. The death of the other species, however, was certainly not a sexual event.

The long, thin but tough, rod-like cells (2 mm long, 0.006 mm wide) of the thick-walled diatom *Thalassiothrix antarctica* („Antarctic sea hair“) remained in the plankton after the fall of *Chaetoceros* and its associates. The masses of diatoms caught by the zooplankton nets were annoying because it was difficult to retrieve undamaged copepods caught in them. However, the mats of glass wool made by the fibre-like *Thalassiothrix* cells that cling together by rows of sharp barbs on their surface, make the sorting of zooplankton samples a nightmare. The tough mats also indicate that the cells of this species are not likely to be a favourite food item of the grazing copepods which must prefer more accessible food like the smaller *Chaetoceros* species we expected to dominate the bloom. The fact that the numbers of the less protected, smaller species declined in the second

half of the experiment suggests that they were selectively grazed down by the zooplankton population that increased during the bloom.

Other common species that continued growing in the patch and outside were *Pseudo-nitzschia* species and *Fragilariopsis kerguelensis* (Fkerg). The needle-like chains of the former superficially resemble a *Thalassiothrix* cell and are probably also grazer resistant. Fkerg cells are boat-shaped and reinforced with thick ribs that make them extremely resistant to crushing. This species, together with *Thalassiothrix*, contributes about 90% of the siliceous sediments accumulating under the ACC, which also happens to be the largest single sink of this element in the oceans. Why so much silica accumulates in a region of iron-limited, low productivity has puzzled oceanographers for long. The processes we followed during the bloom now indicate that it is indeed selective grazing of the faster-growing, less-defended species that leads to dominance of the giant diatoms with their thick silica walls. The latter contain up to six times more silica per carbon than the thin-shelled species, so it is not surprising that the underlying sediments are carpeted with the shells of these robust diatoms. Ultimately, selective grazing by zooplankton is the reason for the heavy silicic acid rain in the ACC.

The acoustic surveys revealed that the copepod population in the patch had increased significantly relative to the outside. As these minute animals grow slowly in cold water the explanation is that they had congregated inside the patch by modifying their patterns of daily vertical migration. When they find more food, copepods decrease the depth at which they spend the day. Since deeper layers move more slowly than upper layers, the higher up they stay, the better they are retained in the food patch. This behaviour has been suspected before but our data provide evidence that it does indeed happen. Another important finding is related to the salps that are widely regarded as food competitors of the copepods and krill that form the base of all important pelagic fisheries from sardines and herring to tuna and whales. Before fertilisation and in the outside water throughout our stay, salps were abundant in the net catches, but as the bloom progressed, their numbers declined and there were hardly any left at the end. We believe that this was due to the salps clogging in the dense bloom of spiny diatoms, meaning that these watery animals do not grow well in blooms, so cannot compete with copepods and krill under such conditions. In other words, salps do best at plankton concentrations typical of iron-limited waters, hence the reported increase in their abundance around Antarctica is an indication of decreasing productivity in these regions.

It is very likely that our bloom boosted growth of the copepods and local krill species but we do not know which carnivores will have profited from the production of this valuable food resource. There are few fish in the ACC and the large rectangular midwater trawl (RMT) that was hauled on several occasions when wind speeds were low enough to enable its deployment, caught mainly the local krill species, chaetognaths (arrow worms) and amphipods. A few whales, seals and penguins were the only top

predators apart from birds on the wing that we saw. There were many birds, particularly the giant wandering albatrosses and petrels of various sizes, that accompanied the ship. Although they feed primarily on zooplankton, their predation pressure is not likely to have been significant. Blooms of the magnitude we induced, albeit dominated by weakly silicified diatoms, form the basis of the rich animal life around coastal areas of Antarctica. Since iron fertilisation stimulated the entire plankton, including the zooplankton, it is tempting to suggest using this technique to enhance productivity in these regions or even extend their size to provide more food for endangered animal populations, in particular whales.

The overarching goal of this interdisciplinary cruise was to find out the fate of iron fertilised blooms in the ACC: is their biomass retained in the surface layer and converted back into CO<sub>2</sub> by bacteria and zooplankton or does at least a part of it sink out, thereby removing significant amounts of CO<sub>2</sub> from the atmosphere and storing it in the deep ocean. Most of the earlier experiments, including EisenEx, were too short to follow the fate of the bloom. So we were lucky in being able to observe also its demise phase. The above question has 2 dimensions, one related to the time scales of thousands of years during which the earth's climate changed through the cycles of ice and warm ages and the other related to the current threat of global warming at time scales of decades. Measurements of ice cores from Antarctica and Greenland have shown that CO<sub>2</sub> concentrations are strongly correlated with temperature but the cause-and-effect relationship is not yet known. Values during glacials reached a low of 180 ppm (0.018%) but increased to 280 ppm during the warm periods. These were the values prevailing till about 150 years ago, but today's values are at 373 ppm and steadily rising at 1.5 ppm per year because of fossil fuel burning. But where did the CO<sub>2</sub> come from and where did it go in the course of the ice age cycles?

The amount of carbon in land plants today is about equivalent to that present as CO<sub>2</sub> in the atmosphere but forests during ice ages (including the tropical rain forests) were of much lesser extent because the earth was colder and drier. So actually even more CO<sub>2</sub> that was bound in plant biomass during the moist, warm ages, went missing during the ice ages. However, the ocean contains about fifty times more CO<sub>2</sub> than the atmosphere and hence is the most likely source and sink over these climate cycles. The ACC plays a special role here because it contains enormous amounts of nutrients that are not used due to iron limitation of the plankton. If all the nitrate in the surface water of the Southern Ocean were converted into plankton biomass, the amount of carbon fixed would amount to about 2 ppm. Over the course of tens or even hundreds of years a maximum of about 50 ppm could be transferred into the deep ocean. The late John Martin, who was the first to show that ACC plankton is iron-limited, suggested in his „iron hypothesis“ that increased dust input during glacials, documented in the same cores in which the CO<sub>2</sub> was measured, would have enhanced productivity of the ACC. On average dust contains 10% iron by weight, so Martin argued that a part of

the carbon produced by the iron-fertilised plankton sank out of the mixed layer and was sequestered in the deep ocean. Geochemists challenge this view because evidence from ACC sediments deposited during the glacial period do not provide clear proof whether this actually happened, so the issue of ACC productivity is being hotly debated these days. The results of our experiment now provide support for the „iron hypothesis“ by showing that open ocean plankton blooms do indeed export carbon. This finding will help solve at least a part of the riddle concerning the whereabouts of a huge amount of carbon in the course of the climate cycles.

The other aspect of our experiment, one that has been reported widely by the press, is whether large-scale iron fertilisation will remove significant amounts of the excess atmospheric CO<sub>2</sub> introduced by humans in the past 100 years, thus alleviating the threat of global warming. In other words, can a process which took many thousands of years in the past, be speeded up to do the same job within a few years? The answer is clearly no because the maximum amount that could be taken out per year is only about 10% of the annual human output. So it would be much more sensible to reduce fossil fuel consumption rather than compensate it by speeding up one of Nature's regulatory processes. True, our experiment has shown that iron-induced blooms can behave much like natural blooms, i.e., they have the same species composition and excess algal cells sink out rapidly taking some of their carbon with them. But we need to analyse our samples first before drawing definitive conclusions.

The CO<sub>2</sub> deficit in the hot spot of our patch amounted to 15 g C/m<sup>2</sup> in the 100 m water column at the end. An equivalent amount of nitrate was taken up, but the giant diatoms took up much more silica than their coastal cousins. Total primary production of algae (the amount of CO<sub>2</sub> converted into organic matter) was equivalent to about double the CO<sub>2</sub> deficit. Bacterial respiration of organic matter on a daily basis was equivalent to about half that produced by the algae during the bloom. So the 3 figures – the amount of nutrients taken up, the primary production and bacterial respiration rates fit rather nicely. Bacterial growth rates actually declined during the phase of algal mortality suggesting that not much of the organic matter released by dying cells was broken-down to CO<sub>2</sub> by this group. Detailed budgets of the amount of carbon produced, grazed, broken down and exported to the depths will be made once all the samples have been processed.

So this ship of terrestrial aliens has found out several interesting aspects about life in the vast spaces of the remote ocean. Some of the suspicions regarding interactions within one of its ecosystems that are of significance to geochemical cycles of our planet were confirmed. This interdisciplinary cruise of physicists, chemists and biologists has reaped a rich harvest from the experiment. RV „Polarstern“ is now on her way back to Cape Town. The temperature is steadily rising, the wind has dropped and the sea is calm. We are extremely grateful to the crew for putting up so bravely with their enforced sojourn in one of the most violent oceans of

this world just because we wanted to do an experiment there. Despite the inconvenience of working on a constantly heaving ship, they were always smiling and went out of their way to help us, regardless of the weather conditions. We are deeply grateful to them.

Best wishes from a ship looking forward to standing on terra firma and enjoying the sights, sounds and smells of land again,  
Victor Smetacek