

5.7 Eisendüngung – Mehr CO₂ Fixierung durch das Meer?

WERA LEUJAK, HARALD GINZKY & ULRICH CLAUSSEN

Ocean iron fertilisation and its potential to sequester carbon dioxide: The addition of the essential micronutrient iron into the upper ocean stimulates phytoplankton blooms. These algae might sink to the deep ocean, thereby drawing down carbon dioxide from the atmosphere. Consequently, it is assumed that iron fertilisation might be an effective method to counteract climate change. 13 field experiments since 1993 have shown that while the method works in principle it was not possible to quantify the amount of carbon that could be potentially sequestered and that the efficiency of iron fertilisation to combat climate change is much lower than initially assumed. Since iron fertilisation changes marine food webs and interferes with complex biogeochemical processes, adverse and unpredictable effects for marine ecosystems and humans are highly likely. Therefore, based on current knowledge, the method does not seem appropriate to combat climate change. Future experiments should be exercised with great care and should especially monitor long-term potential negative effects. These obligations are laid down in an »Assessment framework for scientific research involving ocean fertilisation« that was adopted in 2010 by the London Convention / London Protocol. Commercial iron fertilisation activities are currently forbidden by international law.

Ende der 1980er Jahre äußerte der amerikanische Ozeanograph John Martin den Satz: »Gebt mir einen halben Tanker voll Eisen und ich gebe euch eine Eiszeit« (MARTIN 1990). Damit war die »Eisenhypothese« geboren. Sie geht davon aus, dass die Zugabe von Eisen in bestimmten Regionen der Weltozeane großflächige Algenblüten erzeugt. Beobachtet hatte man diesen Zusammenhang bereits nach Vulkanausbrüchen, bei denen eisenhaltige Vulkanasche freigesetzt wurde. Die Algenblüten absorbieren Kohlendioxid aus der Luft und könnten so dem vom Menschen verursachten Klimawandel entgegenwirken. Damit ist die Eisendüngung eine Methode des Climate Engineering, worunter man die gewollte Manipulation der Umwelt in großem Maßstab versteht. Während viele dieser oft größenwahnsinnig anmutenden Manipulationsansätze momentan nur in der Theorie existieren, wurde die Ozeandüngung bereits experimentell auf offener See getestet. Dabei hat sich schnell gezeigt, dass sich zwar Algenblüten bildeten, die prognostizierten Auswirkungen auf den Klimawandel aber schwer messbar und wenig vorhersagbar sind. Darüber hinaus wurde klar, dass der Eingriff in die sehr komplexen marinen Nahrungsnetze und biogeochemischen Kreisläufe unerwünschte Auswirkungen auf die Meeresökosysteme und die menschliche Gesundheit haben kann.

Nach internationalem Recht sind kommerzielle Ozeandüngungsvorhaben verboten. Experimente zu Forschungszwecken dürfen lediglich durchgeführt werden, wenn sie wissenschaftlich sinnvoll und Risiken ausgeschlossen sind. Nachfolgend soll das Prinzip der Eisendüngung näher erläutert, sowie deren Wirksamkeit und Risiken diskutiert und bewertet werden.

Der Ozean als wichtigster CO₂-Speicher und das Prinzip der Eisendüngung

Die Ozeane sind die größte und wichtigste Kohlenstoffsenke unseres Planeten und speichern ungefähr 50 Mal so viel Kohlenstoff wie die Atmosphäre (IPCC 2001). Es verwundert deshalb nicht, dass sie recht schnell als potenzielle CO₂-Senke in den Fokus des Climate-Engineerings rückten. In der obersten Wasserschicht nehmen kleinste Algen (Phytoplankton) gelöstes CO₂ auf und wandeln es mit Hilfe des Sonnenlichtes in Biomasse um, ein Prozess, der als Photosynthese bezeichnet wird. Das Phytoplankton steht am Anfang der Nahrungsnetze im Meer. Kleine schwebende Tiere, das Zooplankton, ernähren sich von diesen Algen und werden wiederum von Fischen gefressen. Ein Teil der Phytoplankton- und Zooplanktonbiomasse stirbt ab und sinkt als Partikelregen auf den Meeresgrund. Dieser Abwärtstransport treibt die biologische Pumpe an, die 10 bis 11 Gt Kohlenstoff pro Jahr (C/Jahr) in die Tiefen der Ozeane transportiert (ROYAL SOCIETY 2009, IPCC 2001) (Abb. 5.7-1). Während ein Teil des so abwärts transportierten organischen Kohlenstoffs durch bakteriellen Abbau für andere Lebewesen wieder verfügbar gemacht wird, sinkt der andere Teil in Tiefen von >200 m ab (LAMPITT et. al 2008). Dieser Kohlenstoff ist dann für 500 bis zu 1.000 Jahren in der Tiefe festgelegt (sequestriert). Diese biologische Pumpe sorgt dafür, dass der CO₂-Gehalt der Luft um 150–200 ppm unter dem Wert liegt, der ohne ozeanisches Phytoplankton herrschen würde (zum Vergleich, die vom Menschen verursachte Zunahme an CO₂ seit Beginn der Industrialisierung beträgt ungefähr 105 ppm). Die Pumpe funktioniert umso effektiver, je mehr Nährstoffe dem Phytoplankton zum Wachsen zur Verfügung stehen. Ozeandüngung zielt darauf ab, durch die Zugabe von Nährstoffen die Effizienz dieser Pumpe zu steigern.

Eine Ozeandüngung kann durch die Zufuhr von Makronährstoffen wie Phosphor, Stickstoff oder Mikronährstoffen wie Eisen erfolgen. In diesem Artikel soll nur die Eisendüngung betrachtet werden, da zu ihr die meisten Forschungsergebnisse vorliegen. Sie ist besonders effektiv, da Eisen als Mikronährstoff vom Phytoplankton nur in Spuren benötigt wird. Für die Eisendüngung besonders geeignet sind Auftriebsgebiete im Südozean, Nordpazifik und im äquatorialen Pazifik, da dort reichlich Makronährstoffe vorhanden sind und es aber an Eisen mangelt (LAMPITT et al. 2008).

Ergebnisse der Eisendüngungsexperimente

Das erste Eisendüngungsexperiment, Iron Ex I, startete 1993 im östlichen äquatorialen Pazifik. 450 kg Eisen wurden auf einer Fläche von 64 km² verteilt und es bildete sich schnell eine großflächige Blüte von Kieselalgen (CBD 2009). Nach nur vier Tagen verlagerte sich die gedüngte Wasserschicht in größere Tiefen, in denen aufgrund von Lichtmangel keine Photosynthese mehr stattfinden konnte. Auch die Konzentration des Eisens nahm schnell ab, da das reaktive Eisen sich sehr schnell an größere Partikel band und in die Tiefe sank (DE BAAR et al. 2005). Iron Ex I folgten bis 2009 noch 12 weitere Experimente. Die Menge des eingebrachten Eisens und die Größe der gedüngten Fläche nahmen von Experiment zu Experiment zu. Drei der Experimente, Eisenex, EIFEX und LOHAFEX wurden vom deutschen Alfred-Wegener Institut für Polar- und Meeresforschung (AWI) in Kooperation mit wissenschaftlichen Instituten anderer Länder durchgeführt. LOHAFEX erreichte mit der Düngung einer 300 km²

großen Fläche mit 10.000 kg Eisensulfat eine neue Dimension (CBD 2009).

Bereits nach den ersten Düngungsexperimenten machte sich Ernüchterung breit. Zwar bildeten sich Algenblüten, doch waren sie stets kurzlebig und nur ein geringer Teil des Phytoplanktons sank wie erhofft in größere Meerestiefen ab. Der Hauptanteil der Algen wurde vom Zooplankton gefressen oder durch Bakterien sehr schnell remineralisiert (CBD 2009, ROYAL SOCIETY 2009, BOYD et al. 2007, DE BAAR et al. 2005) (Abb. 5.7-2). Neuere Auswertungen des EIFEX Experimentes im Südozean, dass bereits 2004 durchgeführt wurde, haben hingegen erstmals gezeigt, dass nach Eisendüngung über 50% der Kieselalgenblüte >1.000 m tief abgesunken ist und dass nur 11% remineralisiert wurden (SMETACEK et al. 2012). Dieses Ergebnis hat dazu geführt, dass der Eisendüngung nun wieder das Potenzial zugetraut wird, den Klimawandel zu bremsen. Während allerdings die CO₂-Konzentration im Oberflächenwasser in den meisten Experimenten sank, gelang es mit den zur Verfügung stehenden Methoden bisher nicht, einen Nettoexport von CO₂ in die Tiefe nachzuweisen (GÜSSOW et al. 2010, CBD 2009, ROYAL SOCIETY 2009, DE BAAR et al. 2005). Somit steht der eigentliche Nachweis für die Klimawirksamkeit der Eisendüngung bis heute aus.

Trotz dieser eher ernüchternden Ergebnisse besteht ein beträchtliches kommerzielles Interesse am Einsatz von Eisendüngung als Mittel zur Bekämpfung des Klimawandels. Es wird darauf spekuliert, in Zukunft CO₂-Emissionszertifikate für die Ozeandüngung verkaufen zu können, die in einem Emissionshandel anstelle von Reduktionsmaßnahmen an der Quelle gehandelt werden. So plant z.B. das amerikanische Unternehmen

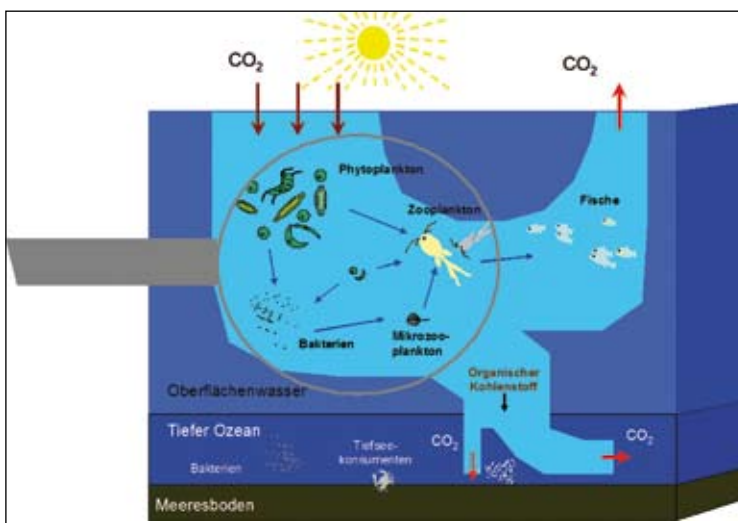


Abb.5.7-1: Das Prinzip der biologischen Pumpe. Phytoplankton entzieht dem Oberflächenwasser CO₂. Sterben die Algen und das Zooplankton ab, sinken sie in Form von »Partikelregen« großer Aggregate zum Meeresboden, wodurch das CO₂ für bis zu 1.000 Jahre aus dem atmosphärischen Kohlenstoffkreislauf entfernt wird (nach: CHISHOLM 2000).

GreenSea Venture Inc. großskalige Experimente, bei denen 8.000 km² Ozeanfläche gedüngt werden sollen (CHISHOLM et al. 2001).

Wie wirksam ist die Eisendüngung als Klimaschutzmaßnahme?

Theoretische Berechnungen des Potenzials der Ozeandüngung zur Festlegung von CO₂ waren zunächst sehr vielversprechend. Man ging davon aus, dass die biologische Pumpe um 10% gesteigert werden könnte, so dass zusätzlich 1 Gt C/Jahr aus der Atmosphäre entfernt werden könnte (ROYAL SOCIETY 2009, KEITH 2001). Das entspricht 12% der anthropogenen CO₂-Freisetzung von 8,5 Gt C/Jahr. Eine andere Studie schätzt, dass Ozeandüngung über einen Zeitraum von 100 Jahren 10% der anthropogenen CO₂-Emissionen (80 Gt C) binden könnte. Dafür müssten aber 20% der globalen Ozeanfläche gedüngt werden (CBD 2009).

Die hypothetischen Annahmen bestätigten sich bisher in keinem der Experimente. Es erwies sich als schwierig, die Menge an Kohlenstoff, die in der Tiefsee festgelegt wird, zu messen, denn es gibt noch keine geeigneten Messmethoden und die Eisendüngungsexperimente müssten über viel längere Zeiträume durchgeführt werden, um solche Messungen überhaupt zu ermöglichen (ROYAL SOCIETY 2009). Die Effizienzberechnungen beruhen daher alle auf Modellergebnissen, wobei die Modelle aufgrund unzureichender Kenntnisse der Ozeanzirkulation und der biogeochemischen Kreisläufe nur zu unsicheren Schätzwerten führen. DE BAAR et al. (2005) berechneten, dass man 9 bis 35 Mio. t Eisen pro Jahr in die Weltmeere einbringen müsste, um CO₂-Emissionen von 6,6 Gt C/Jahr zu speichern. Diese

Menge entspricht der Ladung von 150.000 bis 600.000 Güterwagons (à 60 t) bzw. von 45 bis 175 Massengutfrachtern (angenommene Ladekapazität der Schiffe 200.000 tdw). Die hohe Variabilität dieser Schätzwerte begründet sich in den unterschiedlichen Ausgangsbedingungen in den Meeresregionen und der starken Abhängigkeit der Wirksamkeit der Eisendüngung von den lokalen Witterungsbedingungen. So werden Phytoplankton und Eisen bei stürmischer See sehr schnell in größere Tiefen transportiert, wo dann nicht mehr genug Licht für das Wachstum der Algen zur Verfügung steht (DE BAAR et al. 2008, 2005).

Fest steht auch, dass die Klimawirkung der Ozeandüngung erst sehr langsam einsetzen würde, denn die Algen sinken nur langsam in die Tiefe ab und die Erdtemperatur reagiert mit starker zeitlicher Verzögerung auf veränderte CO₂-Konzentrationen (LENTON & VAUGHAN 2009). Die Düngung müsste darüber hinaus auch über sehr lange Zeiträume (>100 Jahre) aufrecht erhalten werden, um den atmosphärischen CO₂-Gehalt nachhaltig zu beeinflussen (LENTON & VAUGHAN 2009). Um den Netto-Effekt der Eisendüngung bestimmen zu können, ist eine umfassende CO₂-Bilanz erforderlich, die dabei auch das CO₂ berücksichtigt, das bei der Herstellung des Eisendüngers, beim Transport und bei der Ausbringung entsteht sowie andere Treibhausgase, die in den gedüngten Gebieten freigesetzt werden könnten. Algen setzen auch das toxische Dimethylsulfid (DMS) frei, das aber klimakühlend wirkt. Letztendlich sollte eine umfassende Kosten-Nutzen-Analyse auch die Folgekosten von negativen Auswirkungen der Eisendüngung auf Mensch und Umwelt berücksichtigen (z.B. veränderte Nahrungsnetze, giftige Algenblüten).

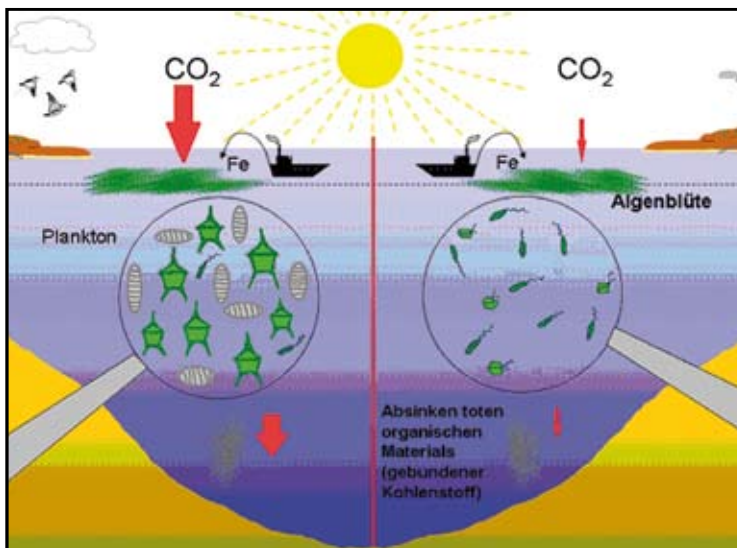


Abb. 5.7-2: Theoretisch soll die Eisendüngung Blüten von Kieselalgen und Dinoflagellaten hervorbringen, die aufgrund ihres schweren Siliziumskelettes oder ihrer Größe schnell zum Meeresboden sinken (*links*). Bei LOHAFEX wurde die Algenblüte jedoch von kleinen leichten Flagellaten dominiert (*rechts*), die schnell von Ruderfußkrebsen gefressen wurden (Quelle: UBA).

Risiken der Eisendüngung für Mensch und Umwelt

Eisendüngung greift massiv in biogeochemische Kreisläufe und die sehr komplexe Struktur sowie Funktion mariner Ökosysteme ein (CBD 2009, STRONG et al. 2009, CULLEN & BOYD 2008). Unerwünschte, schädliche und letztlich unkalkulierbare Auswirkungen auf die Meeresumwelt und den Menschen sind deshalb sehr wahrscheinlich. Viele dieser Auswirkungen können heute noch nicht bewertet werden, da die bisherigen Experimente zu kleinskalig waren und nicht lange genug andauerten, um solche Effekte nachzuweisen. Zu erwarten ist, dass die großflächige Ozeandüngung zu Effekten führt, die denen der Eutrophierung ähneln, einem gut untersuchten Phänomen, das in den Meeresgewässern durch übermäßige Nährstoffzufuhr auftritt (ROYAL SOCIETY 2009). So weiß man bereits, dass eine erhöhte Nährstoffzufuhr die Zusammensetzung des Phytoplanktons verändert und zu toxischen Algenblüten führen kann, die eine Gefahr für Menschen und Meerestiere darstellen (LENTON & VAUGHAM 2009, LAMPITT et al. 2008). Bei Eisendüngungsexperimenten vermehrten sich Kieselalgen der Gattung *Pseudonitzschia*, die das Nervengift Domoinsäure produzieren (TRICK et al. 2010). Negative Auswirkungen der Eisendüngung sind auch durch den Abbau großer Mengen abgestorbener Biomasse in der Wassersäule und am Meeresgrund zu erwarten. Dieser Abbau kann zu Sauerstoffmangel und zum Erstickungstod von Meerestieren führen und darüber hinaus auch zur Freisetzung sehr potenter Treibhausgase wie Lachgas (300 mal so wirksam wie CO₂) (CBD 2009; CHISHOLM 2000). Die hohe Konzentration von CO₂ im Tiefenwasser bedingt eine Versauerung der Tiefsee, wobei Tiefseeorganismen besonders empfindlich auf Veränderungen des pH-Wertes mit erschwelter Kalkskelettbildung, geringerem Wachstum und eingeschränkter Vermehrung reagieren (CBD 2009, SEIBEL & WALSH 2001). Im Oberflächenwasser kann die Versauerung der Meere dagegen verlangsamt werden. Schließlich dürfen potenzielle Effekte in den Ozeangebieten, die über Meeresströmungen mit Wassermassen aus gedüngten Regionen versorgt werden, nicht vernachlässigt werden. Dabei kommt es zum »nutrient robbing«, denn den Wassermassen wurden für das Algenwachstum essentielle Nährstoffe bereits entzogen, so dass sich die Algenbiomasseproduktion nur örtlich verlagern könnte. Dieses Phänomen müsste auch Eingang in eine Klimabilanz von möglichen Eisendüngungsmaßnahmen finden, um eine realistische Abschätzung der Klimateffizienz der Eisendüngung zu ermöglichen.

Rechtliche Regelung

Die Vertragsstaaten der Londoner Konvention (London Convention - LC) über die Verhütung der Meeresverschmutzung durch das Einbringen von Abfällen und anderen Stoffe sowie des entsprechenden Londoner Protokolls (LP) haben im Oktober 2008 den – rechtlich zwar unverbindlichen, aber politisch sehr bedeutsamen – Beschluss gefasst, dass nach derzeitiger Kenntnislage nur Forschungsmaßnahmen im Bereich der Meeresdüngung weiterhin erlaubt sein sollen, alle anderen Maßnahmen, insbesondere solcher kommerzieller Natur, hingegen verboten sind.

Die Vertragsstaaten der Konvention über die Biologische Vielfalt (CBD) haben im Mai 2008 einen inhaltlich weitgehend identischen Beschluss wie der LC/LP-Beschluss vom Oktober 2008 gefasst, der 2010 bestätigt wurde. Dieser Beschluss wurde auf der folgenden CBD-Vertragsstaatenkonferenz im Jahr 2010 bestätigt. Die Beschränkung der Eisendüngung auf Forschungsvorhaben und die Ablehnung aller kommerziellen Aktivitäten sind also – zumindest politisch – weltweit akzeptiert.

Nach einem im Jahre 2010 im Rahmen von LC/LP verabschiedeten Bewertungsrahmen (»Assessment Framework for scientific research involving ocean fertilisation«) sind Forschungsaktivitäten im Vorfeld daraufhin zu überprüfen, ob (1) die Experimente erforderlich sind, (2) es sich um hochqualitative Forschung handelt und (3) von ihnen unvermeidbare Umweltauswirkungen ausgehen. Die Bewertung verlangt ferner, dass die betroffenen Behörden, die Öffentlichkeit sowie Drittstaaten zu dem Forschungsvorhaben im Vorfeld Stellung nehmen können und dass die erzielten Forschungsergebnisse später zeitnah veröffentlicht werden. Kommerzielle Interessen dürfen das Design und die Durchführung der Forschungsvorhaben nicht beeinflussen.

Die Vertragsstaaten von LC/LP beabsichtigen, das Verbot der kommerziellen Anwendung und die Kontrollpflicht bei Forschungsvorhaben in rechtlich verbindliche Regelungen zu überführen. Die Vorschriften sollen neben der Ozeandüngung auch für sonstige marine Geo-Engineering-Maßnahmen gelten.

Schlussbetrachtung

Die derzeitigen Forschungsergebnisse begründen erhebliche Zweifel, ob die Meeresdüngung eine effektive Maßnahme zur Bekämpfung des Klimawandels darstellt. Gegenwärtig gibt es keine belastbaren Erkenntnisse dafür, dass die Eisendüngung der Ozeane in der Lage ist, den atmosphärischen CO₂-Gehalt in einem für das Klima relevanten Ausmaß und ohne bzw. mit

akzeptablen Wirkungen auf Meeresökosysteme zu reduzieren. Es bestehen auch erhebliche Zweifel an der ausreichenden Langfristigkeit der Speicherung und an der Effizienz der Methoden. Unerwünschte und schädliche Auswirkungen sind sehr wahrscheinlich, da die Ozeandüngung in sehr komplexe marine Nahrungsnetze und biogeochemische Kreisläufe eingreift. Künftige Eisendüngungsexperimente sollten insbesondere die Auswirkungen auf tiefere Wasserschichten, auf die Sedimente und bodenlebenden Organismen untersuchen. Zusätzlich halten wir eine Klimabilanz unter Berücksichtigung externer Kosten (Herstellung, Transport, Ausbringung des Düngers), Auswirkungen des »nutrient robbing«, Produktion anderer Treibhausgase und alle Folgekosten für Mensch und Umwelt für erforderlichlich.

Nicht vereinbar wäre eine durch Ozeandüngung herbeigeführte Eutrophierung mit den Zielen der globalen, europäischen und regionalen Meeresschutzpolitik, die sich seit über 20 Jahren bemüht, die Nährstoffeinträge in die Meeresökosysteme zu reduzieren. Die Ozeandüngung würde somit auch einen Paradigmenwechsel im internationalen Meeresschutz darstellen, der bislang darauf ausgerichtet ist, den Eintrag schädlicher Stoffe zu vermeiden oder zu vermindern. Im Klimaschutz sollten grundsätzlich die Steigerung der Energieeffizienz, der Einsatz von erneuerbaren Energien, Mitigationsmaßnahmen an den Quellen und Anpassungsmaßnahmen Vorrang vor riskanten und unberechenbaren Climate-Engineering Maßnahmen haben. Leider wird heutzutage noch nicht ausreichend gewürdigt, dass intakte und gesunde Küstenökosysteme wie Salzwiesen, Seegraswiesen und Mangroven ganz erheblich zur Speicherung von Kohlenstoff beitragen (»blue carbon«) und darüber hinaus auch einen Beitrag zum Erhalt der Biodiversität und zum Küstenschutz leisten und den Lebensunterhalt von Millionen von Menschen sichern (NELLEMANN et al. 2009, DUARTE et al. 2004). Die Integrität dieser Ökosysteme darf nicht durch Risikotechnologien wie Eisendüngung gefährdet werden. Schutz und Erhalt dieser Ökosysteme sind auch Grundlagen für einen erfolgreichen Klimaschutz.

Literatur

- BOYD P. W., JICKELLS T., LAW, C.S. et al. (2007): Mesoscale iron enrichment experiments 1993-2005: synthesis and future directions. *Science*, Band 315, 612-617.
- CBD (2009): Scientific Synthesis of the impact of ocean fertilization on marine biodiversity. Montreal, Technical Series No. 45, 53 pp.
- CHISHOLM S.W. (2000): Stirring times in the Southern Ocean. *Nature*, Band 407, 685 pp.
- CHISHOLM S. W., FALKOWSKI P. G., CULLEN J. J. (2001): Discrediting ocean fertilization. *Science*, Band 294, 309-310.
- CULLEN J. J. & BOYD P. W. (2008): Predicting and verifying the intended and unintended consequences of large-scale ocean iron fertilization. *Marine Ecology Progress Series*, Band 364, 295-301.
- DE BAAR H. J. W., GERRINGA L. J. A., LAAN P. & TIMMERMANS K. R. (2008): Efficiency of carbon removal per added iron in ocean iron fertilization. *Marine Ecology Progress Series*, Band 364, 269-282.
- DEBAAR H. J. W., BOYD P. W., COALE K. H., LANDRY M. R., TSUDA A., ASSMY P. et al. (2005): Synthesis of iron fertilization experiments: from the Iron Age in the age of enlightenment. *Journal of Geophysical Research*, Band 110.
- DOLMAN A. J., VAN DER WERF G. R., VAN DER MOLEN M. K., GANSSEN G., ERISMAN J.-W. & STRENGERS B. (2010): A carbon cycle science update since IPCC AR-4. *Ambio*, Band 39, 402-412.
- DUARTE C.M., MIDDELBURG J. J. & CARACO N. (2004): Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences Discussions*, Band 1, 659-679.
- GÜSSOW K., PROELSS A., OSCHLIES A., REHDANZ K. & RICKELS W. (2010): Ocean iron fertilization: Why further research is needed. *Marine Policy*, Band 43, Ausgabe 3, 911-918.
- IPCC (2001): *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer, P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, USA, 881 pp.
- KEITH D.W. (2001): Geoengineering. *Nature*, Band 409, 420 pp.
- LAMPITT R. S., ACHTERBERG E. P., ANDERSON T. R., HUGHES J. A., IGLESIAS-RODRIGUEZ M. D., KELLY-GERREYN B. A., LUCAS M., POPOVA, E. E., SANDERS R., SHEPHERD J. G., SMYTHE-WRIGHT D. & YOOL A. (2008): Ocean fertilization: a potential means of geoengineering? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, Band 366, 3919-3945.
- LENTON T. M. & VAUGHAN N. E. (2009): The radiative forcing potential of different climate geoengineering options. *Atmospheric Chemistry and Physics*, Band 9, 5539-5561.
- MARTIN J. (1990): Glacial-interglacial CO₂ change: the iron hypothesis. *Paleoceanography*, Band 5, 1-13.
- NELLEMANN C., CORCORAN E., DUARTE C. M., VALDES L., DE YOUNG C., FONSECAL & GRIMSDITCH G. [Eds] (2009): *Blue Carbon – The role of healthy oceans in binding carbon. A rapid response assessment*. United Nations Environment Programme, GRID-Arenda.
- ROYAL SOCIETY (2009): *Geoengineering the climate – Science, governance and uncertainty*. Policy document 10/09. The Royal Society, London, 84 pp.
- SEIBEL B. A. & WALSH P. J. (2001): Potential impacts of CO₂ injection on deep-sea biota. *Science*, Band 294, 319-320.
- STRONG A., CHISHOLM S., MILLER C. & CULLEN J. (2009): Ocean fertilization: time to move on. *Nature*, Band 461, 347-348.
- TRICK C. G., BILL B. D., COCHLAN W. P., WELLS

- M. L., TRAINER V. L. & PICKELL L. D. (2010): Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). Online-Publikation vor dem Druck 15. März 2010, doi: 10.1073/pnas.0910579107. <http://www.pnas.org/content/early/2010/02/24/0910579107.full.pdf+html>.
- SMETACEK V., KLAAS C.; STRASS V.H., ASSMY, P., MONTRESOR, M., CISEWSKI B., SAVOYE, N. et al. (2012): Deep carbon export from a Southern Ocean iron-fertilized diatom bloom. Nature, Band 487, 313-319.
- STRONG A., CHISHOLM S., MILLER C. & CULLEN J. (2009): Ocean fertilization: time to move on. Nature, Band 461, 347-348.
- TRICK C. G., BILL B. D., COCHLAN W. P., WELLS M. L., TRAINER V. L. & PICKELL L. D. (2010): Iron enrichment stimulates toxic diatom production in high-nitrate, low-chlorophyll areas. Proceedings of the National Academy of Sciences (PNAS). Online-Publikation vor dem Druck 15. März 2010, doi: 10.1073/pnas.0910579107. <http://www.pnas.org/content/early/2010/02/24/0910579107.full.pdf+html>.

Dr. Wera Leujak

Dr. Harald Ginzky

Dipl. Biol. Ulrich Claussen

Umweltbundesamt

Wörlitzer Platz 1 - 06844 Dessau

wera.leujak@uba.de

harald.ginzky@uba.de

ulrich.claussen@uba.de