



**Beeinflussen klimatische Extremereignisse  
den globalen Kohlenstoffkreislauf?**



## Zusammenfassung

Die Auswirkungen von Klimaextremen auf den Kohlenstoffkreislauf von Land-Ökosystemen sind noch nicht vollständig aufgeklärt. Es zeichnet sich jedoch ab, dass klimatische Extremereignisse oft eine überproportionale Freisetzung von Kohlendioxid (CO<sub>2</sub>) zur Folge haben. Am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena wird in aktuellen Forschungsprojekten der Abteilung „Biogeochemische Integration“ abgeschätzt, wie relevant dieses Phänomen auf globaler Skala ist.

## Summary

The consequences of climate extremes on the carbon cycle of land ecosystems are not yet fully understood. However, it is becoming apparent that climate extremes tend to trigger a disproportionately high release of carbon dioxide (CO<sub>2</sub>). Current research in the department “Biogeochemical Integration” at the Max Planck Institute for Biogeochemistry in Jena aims at estimating the relevance of this phenomenon at global scales.

## Hintergrund

Die Klimaforschung befasst sich zunehmend mit der Frage, wie das Auftreten klimatischer Extremereignisse (z. B. Hitzewellen oder Dürren) mit dem Klimawandel zusammenhängt. Es geht speziell darum, zu verstehen, wie sich in der Folge des Klimawandels charakteristische Eigenschaften von Extremereignissen verändern. Vor allem deren Häufigkeiten, mittlere Intensitäten, räumliche Ausdehnungen und Dauer, aber auch die geographischen Verteilungsmuster könnten in naher Zukunft von den bisherigen Beobachtungen abweichen. Die Relevanz, die dieser Frage zukommt, lässt sich auch an ihrem Stellenwert in der Arbeit des Weltklimarats (Intergovernmental Panel for Climate Change, IPCC) ablesen [1].

Am Max-Planck-Institut für Biogeochemie in Jena wird eine weitere Begleiterscheinung sich ändernder Klimaextreme untersucht: Wie beeinflussen extreme hydrometeorologische Ereignisse (z. B. Dürreperioden) den Kohlenstoffkreislauf von terrestrischen Ökosystemen [2]? Eine Reihe von gut dokumentierten Ereignissen zeigt, dass in der Folge einzelner Klimaextreme die Kapazität bestimmter Ökosysteme, langfristig Kohlenstoff zu speichern, beeinträchtigt wird. Die europäische Hitzewelle 2003 ist mittlerweile ein „klassisches Beispiel“ dafür, wie Einzelereignisse die Kohlenstoffakkumulation von mehreren Jahren zunichtemachen

können [3]. Auch die Analysen von Dürreperioden, wie sie z. B. von 2000 bis 2004 in den USA [4] oder 2005 und 2010 im Amazonasgebiet [5] auftraten, lassen darauf schließen, dass solche Extreme wichtige Ökosystemfunktionen beeinträchtigen.

Es gibt also ernst zu nehmende Hinweise darauf, dass die Kohlenstoffspeicher von Landökosystemen beeinträchtigt werden, sollten sich bestimmte Klimaextreme in den kommenden Jahrzehnten tatsächlich intensivieren. Das bedeutet, dass ein wichtiger Puffermechanismus im Klimasystem geschwächt werden könnte, was dem Klimawandel weiteren Antrieb verleihen würde.

## Globale Beobachtungen

Um die Interaktionen von Landökosystemen und Klima unter Extrembedingungen besser verstehen zu können, müssen zunächst die ökologischen Konsequenzen von Extremereignissen aufgeklärt werden [6]. Daneben ist auch die Frage besonders wichtig, in welchen geographischen Gebieten Klimaextreme besonders starke Auswirkungen auf den Kohlenstoffkreislauf haben, das heißt zu substantiellen Veränderungen von  $\text{CO}_2$ -Flüssen und Kohlenstoffvorräten führen [2].

Eine wichtige Grundlage zur Erforschung dieser Fragen stellen die stetig wachsenden globalen Datenarchive dar. So wurde die solide Interpretation der

Hitzewelle von 2003 erst durch das Ausschöpfen der vollen Bandbreite von lokalen Messungen und Satellitenbeobachtungen möglich gemacht. Insbesondere Eddy-Kovarianz-Messungen von Kohlenstoffflüssen aus Ökosystemen innerhalb des FLUXNET-Netzwerks (zusammen mit regionalen Initiativen) haben das Verständnis der am Kohlenstoffkreislauf beteiligten Prozesse wesentlich verbessert. Dieser Fortschritt erlaubt es gegenwärtig, vor allem in Europa und in den USA, bessere Analysen auf regionaler und kontinentaler Ebene durchzuführen.

Aus globaler Perspektive decken die Beobachtungen den relevanten geographischen Raum und zeitlichen Rahmen nur eingeschränkt ab. Ein großes Problem ist, dass die Wahrscheinlichkeit, Auswirkungen von Klimaextremen direkt zu beobachten, sehr gering ist. Das liegt zum einen in der seltenen Natur dieser Ereignisse, aber eben auch in der ungenügenden Abdeckung der Erdoberfläche mit den relevanten Beobach-

tungssystemen, wie den Eddy-Kovarianz-Türmen. Statistische Methoden, die verwendet werden, um die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Jahrhundert-Hochwassers zu schätzen, sind für den Kohlenstoffkreislauf daher (noch) nicht entwickelt bzw. nicht anwendbar. Alternativen bieten hier etwa Langzeitdaten von Baumringanalysen [7] oder jährlichen Ernteerträgen. Beide ermöglichen jedoch nur sehr indirekte Schätzungen von extremen Veränderungen im Kohlenstoffkreislauf.

## Alternative Möglichkeiten zur Prozessaufklärung

Eine weitere Möglichkeit, den Kohlenstoffkreislauf auf globaler Ebene besser zu charakterisieren, eröffnet sich durch moderne, empirisch gewonnene oder modellierte globale Daten zum Land-Atmosphären Austausch von  $\text{CO}_2$ . Diese Datensätze rekonstruieren die Kohlenstoffflüsse zwischen Land und Atmosphäre während der Satellitenära, etwa in den letzten 30 Jahren, sehr präzise. Die

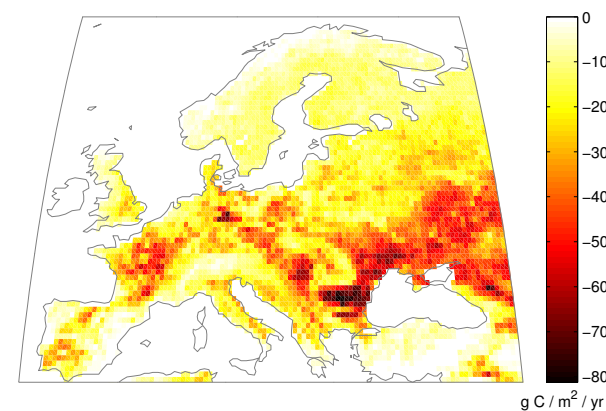


Abb. 1: Mittlere Verringerung der Bruttoprämarproduktion während klimatischer Extremereignisse in Europa über die letzten 30 Jahre.

Beispielanalyse (Abb. 1) eines solchen empirisch gewonnenen Datensatzes der terrestrischen Bruttopräprimärproduktion (GPP), also der Gesamtproduktion pflanzlicher Biomasse durch Photosynthese, zeigt, wie man die Auswirkungen von Extremereignissen quantifizieren kann. Da keine langen Zeitreihen zur Verfügung stehen, werden die raumzeitlichen Korrelationen der Daten genutzt, um so möglichst robust die Verringerung von GPP in der Folge von Klimaextremen zu quantifizieren. Mit einem dreidimensionalen (geogr. Breite x geogr. Länge x Zeit) Segmentierungsansatz [8] werden raumzeitlich zusammenhängende Extreme ermittelt. Selbst wenn die Daten auf lokaler Ebene verärsucht und unsicher sind, lassen sich extreme Belastungen der Ökosysteme mithilfe der Regionen feststellen, in welchen solche Belastungen über einen großen Zeitraum oder auf einem großen Gebiet stattfanden. Abbildung 1 zeigt den integrierten Effekt der 100 größten Extremereignisse, die in der Bruttopräprimärproduktion der letzten 30 Jahre widerspiegelt sind. Man sieht deutlich, dass die Gebiete rund um das Schwarze Meer, in Deutschland und in Frankreich besonders anfällig für Veränderungen der Bruttopräprimärproduktion als Folge von Klimaextremen sind.

### Verschiedene Arten von Klimaextremen

Doch welche Art von Klimaextremen haben die stärksten Auswirkungen auf den globalen Kohlenstoffkreislauf? Die

jüngsten Studien zeigen, dass langanhaltende Dürren die Hauptursache für extreme Verringerungen der weltweiten Bruttopräprimärproduktion darstellen. Hitzeperioden spielen zwar regional auch eine wichtige Rolle, sind aber global von eher untergeordneter Bedeutung. Es ist sehr wahrscheinlich, dass in Zukunft in weiten Teilen der Erde Dürren und Hitzeperioden in ihrer Intensität und Häufigkeit zunehmen werden [1]. Somit könnten solche Extremereignisse durchaus zu einer positiven Rückkopplung und damit Verstärkung des Klimawandels beitragen.

Es sind aber nicht unbedingt die Extreme in den einzelnen Variablen des Wasserkreislaufs, wie Niederschlag, Frost, Bodenwasser, Lufttemperatur, die die stärksten Auswirkungen auf den Kohlenstoffkreislauf haben. Oft kommt es auf die Konstellation der Variablen zueinander an. Auch die raumzeitliche Verknüpfung verschiedener Extremereignisse spielt eine wichtige Rolle. So verstärken sich beispielsweise Dürren und Hitzeperioden gegenseitig, so dass das gleichzeitige oder nacheinander folgende Auftreten beider zu unverhältnismäßig großen Auswirkungen führt. Es wurde z. B. gezeigt [9], dass in Situationen, in denen verschiedene Variablen gleichzeitig extreme Werte annehmen oder verschiedene Arten von Extremereignissen zeitlich aufeinander folgen (sogenannte compound events) mit den schlimmsten Auswirkungen zu rechnen ist. Allerdings können sogar extreme

Auswirkungen auftreten, wenn jede Variable für sich genommen nicht extrem ist. Ursachen dafür können z. B. seltene und ungünstige Konstellationen von klimatischen Treibern im höherdimensionalen Wahrscheinlichkeitsraum sein. Das lässt sich leicht in einem Zwei-Variablen-System vorstellen und berechnen (Abb. 2), wird aber schnell wesentlich komplizierter, wenn die Anzahl der Variablen zunimmt. Zukünftige Studien müssen eindeutig mehr in diese Richtung arbeiten, wodurch auch Modellsimulationen unverzichtbar werden.

### Klimaextreme von bisher unbekannter Intensität

Neben der Analyse von ‘compound events’ gibt es noch einen weiteren wichtigen Aspekt, der derzeit von Klimaforschern diskutiert wird. Dabei geht es um die Frage nach noch nie

dagewesenen Klimaextremen [10], also Ereignissen, die man in dieser Stärke noch nie vorher beobachtet hat. Extrem hohe Sommertemperaturen an einem bestimmten Ort, die die Messrekorde dort übertreffen, fallen etwa in diese Kategorie. Typischerweise wird als Maß für die Stärke eines Extrems die Intensität (Temperatur, Wasserdefizit, etc.) herangezogen, aber man könnte auch die räumliche Ausdehnung oder Dauer untersuchen. In unmittelbarem Zusammenhang mit diesen Betrachtungen steht die Frage, ob Ökosysteme nachhaltig beeinträchtigt werden, wenn bestimmte Schwellenwerte überschritten werden [6]. Dabei muss man allerdings auch in Betracht ziehen, in welchem Ausmaß biologische Anpassungen die Auswirkungen von Klimaextremen potentiell dämpfen können. Diese letzte Frage, ist einer der schwierigsten in dem hier dargestellten Forschungsbereich.

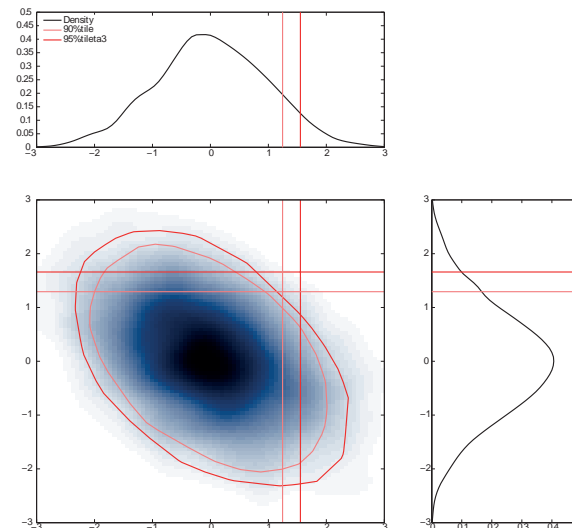


Abb. 2: Definition univariater und bivariater Extrema. Jede äußere Grafik zeigt die Häufigkeitsverteilung einer hypothetischen Variablen; die innere Grafik zeigt deren gemeinsame Häufigkeitsverteilung. Die roten geraden Linien zeigen mögliche Schwellenwerte, ab denen man einen Wert als Extrem bezeichnen könnte. Im bivariaten Fall sieht man, dass die Konstellation zweier an sich nicht extremer Werte als Extrem gewertet werden könnte.

## Danksagung:

Wir danken Dr. Anja Rammig (PIK) für wichtige Kommentare und Beiträge zu dem Manuskript. Dieser Text basiert auf einem Beitrag im iLEAPS newsletter, Mahecha et al. (in press). Die Arbeit an diesem Thema wurde durch das FP7 Projekt CARBO-Extreme (FP7-ENV-2008-1-226701) ermöglicht.

## Literaturhinweise

1. Field, C. B.; Barros, V.; Stocker, T. F.; Qin, D.; Dokken, D. J.; Ebi, K. L.; Mastrandrea, M. D.; Mach, K. J.; Plattner, G.-K.; Allen, S. K.; Tignor, M.; Midgley, P. M. (Eds.) IPCC 2012: Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge (UK), New York (USA)
2. Reichstein, M.; Bahn, M.; Ciais, P.; Frank, D.; Mahecha, M. D.; Seneviratne, S. I.; Zscheischler, J.; Beer, C.; Buchmann, N.; Frank, D. C.; Papale, D.; Rammig, A.; Smith, P.; Thonicke, K.; van der Velde, M.; Vicca, S.; Walz, A.; Wattenbach, M. Climate extremes and the carbon cycle. *Nature* 500, 287-295 (2013)
3. Ciais, P.; Reichstein, M.; Viovy, N.; Granier, A.; Ogée, J.; Allard, V.; Aubinet, M.; Buchmann, N.; Bernhofer, C.; Carrara, A.; Chevallier, F.; De Noblet, N.; Friend, A. D.; Friedlingstein, P.; Grünwald, T.; Heinesch, B.; Keronen, P.; Knohl, A.; Krinner, G.; Loustau, D.; Manca, G.; Matteucci, G.; Miglietta, F.; Ourcival, J. M.; Papale, D.; Pilegaard, K.; Rambal, S.; Seufert, G.; Soussana, J. F.; Sanz, M. J.; Schulze, E. D.; Vesala, T.; Valentini, R. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature* 437, 529-533 (2005)
4. Schwalm, C. R.; Williams, C. A.; Schaefer, K.; Baldocchi, D.; Black, T. A.; Goldstein, A. H.; Law, B. E.; Oechel, W. C.; Paw U, K. T.; Scott, R. L. Reduction in carbon uptake during turn of the century drought in western North America. *Nature Geoscience* 5, 551-556 (2012)
5. Phillips, O. L.; Aragão, L. E. O. C.; Lewis, S. L.; Fisher, J. B.; Lloyd, J.; López-González, G.; Malhi, Y.; Monteagudo, A.; Peacock, J.; Quesada, C. A.; van der Heijden, G.; Almeida, S.; Amaral, I.; Arroyo, L.; Aymard, G.; Baker, T. R.; Bánki, O.; Blanc, L.; Bonal, D.; Brando, P.; Chave, J.; de Oliveira, A. C. A.; Cardozo, N. D.; Czimczik, C. I.; Feldpausch, T. R.; Freitas, M. A.; Gloor, E.; Higuchi, N.; Jiménez, E.; Lloyd, G.; Meir, P.; Mendoza, C.; Morel, A.; Neill, D. A.; Nepstad, D.; Patiño, S.; Peñuela, M. C.; Prieto, A.; Ramírez, F.; Schwarz, M.; Silva, J.; Silveira, M.; Thomas, A. S.; ter Steege, H.; Stropp, J.; Vásquez, R.; Zelazowski, P.; Dávila, E. A.; Andelman, S.; Andrade, A.; Chao, K.-J.; Erwin, T.; Di Fiore, A.; Honorio, E. C.; Keeling, H.; Killen, T. J.; Laurance, W. F.; Cruz, A. P.; Pitman, N. C. A.; Vargas, P. N.; Ramírez-Angulo, H.; Rudas, A.; Salamão, R.; Silva, N.; Terborgh, J.; Torres-Lezama, A. Drought sensitivity of the Amazon rainforest. *Science* 323, 1344-1347 (2009)
6. Reyer, C.; Leuzinger, S.; Rammig, A.; Wolf, A.; Bartholomeus, R. P.; Bonfante, A.; de Lorenzi, F.; Dury, M.; Gloning, P.; Abou Jaoudé, R.; Klein, T.; Kuster, T. M.; Martins, M.; Niedrist, G.; Riccardi, M.; Wohlfahrt, G.; de Angelis, P.; de Dato, G.; François, L.; Menzel, A. A plant's perspective of extremes: terrestrial plant responses to changing climatic variability. *Global Change Biology* 19, 75-89 (2012)
7. Babst, F.; Carrer, M.; Poulter, B.; Urbinati, C.; Neuwirth, B. 500 years of regional forest growth variability and links to climatic extreme events in Europe. *Environmental Research Letters* 7, 045705 (2012)
8. Zscheischler, J.; Mahecha, M. D.; von Buttlar, J.; Harmeling, S.; Jung, M.; Rammig, A.; Randerson, J. T.; Schölkopf, B.; Seneviratne, S. I.; Tomelleri, E.; Zaehle, S.; Reichstein, M. Few extreme events dominate global interannual variability in gross primary production. *Environmental Research Letters* 9, 035001 (2014)
9. Leonard, M.; Westra, S.; Phatak, A.; Lambert, M.; van den Hurk, B.; McInnes, K.; Risbey, J.; Schuster, S.; Jakob, D.; Stafford-Smith, M. A compound event framework for understanding extreme impacts. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 5, 113-128 (2013)
10. Anderson, A.; Kostinski, A. Reversible record breaking and variability: temperature distributions across the globe. *Journal of Applied Meteorology and Climatology* 49, 1681-1691 (2010)

## Arbeitsgruppe „Globale Empirische Inferenz“

Die Analyse komplexer Datensätzen spielt in den Geowissenschaften eine immer größere Rolle.

Lange Beobachtungszeitreihen informieren über die Reaktionen terrestrischer Ökosysteme auf klimatische oder anthropogen bedingte Veränderungen. Unser interdisziplinäres Team entwickelt neue Methoden, um die in solchen Datensätze enthaltenen Informationen zu entschlüsseln und unser Wissen über das Verhalten von Landökosystemen zu erweitern.

Dr. Miguel Mahecha studierte Geoökologie an den Universitäten Bayreuth und Exeter, U.K., bevor er an seiner Dissertation zu den Wechselwirkungen zwischen Ökosystemen und der Atmosphäre am Max-Planck-Institut für Biogeochemie und der ETH Zürich arbeitete. Seit Oktober 2012 leitet er die Forschungsgruppe „Globale Empirische Inferenz“ in der Abteilung Biogeochemische Integration.



Gruppenleitung:  
Dr. Miguel Mahecha

Tel.: +49 (0)3641 57-6265  
E-Mail: [mmahecha@bgc-jena.mpg.de](mailto:mmahecha@bgc-jena.mpg.de)



## Impressum

Text:  
Dr. Miguel Mahecha,  
Dr. Jakob Zscheischler, Dr. Dorothea  
Frank, Prof. Dr. Markus Reichstein

Deckblatt Bildnachweis:  
Schäden durch Borkenkäferbefall, Großer  
Rachel, Nationalpark Bayrischer Wald,  
Copyright Martin Thurner

## Herausgeber: Max-Planck-Institut für Biogeochemie

Hans-Knöll-Straße 10  
D-07745 Jena  
Tel.: +49-(0)3641-5760  
Fax: +49-(0)3641-5770

E-Mail: [info@bgc-jena.mpg.de](mailto:info@bgc-jena.mpg.de)  
Web: [www.bgc-jena.mpg.de](http://www.bgc-jena.mpg.de)

Forschungskoordination & Presse:  
Dr. Eberhard Fritz  
Presse- & Öffentlichkeitsarbeit:  
Susanne Héjja

Layout, Satz: Silvana Schott

Jena, 2015