

A Global Analysis of Extreme Events and Consequences for the Terrestrial Carbon Cycle

Doctoral Thesis

Author(s):

Zscheischler, Jakob

Publication date:

2014

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010280484>

Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

***A GLOBAL ANALYSIS OF EXTREME EVENTS
AND CONSEQUENCES FOR THE
TERRESTRIAL CARBON CYCLE***

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by
JAKOB ZSCHEISCHLER

Dipl.-Math., Humboldt University of Berlin
born on 16.08.1985
citizen of Germany

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Sonia I. Seneviratne, examiner
Dr. Miguel M. Mahecha, co-examiner
Dr. Stefan Harmeling, co-examiner
Prof. Dr. Hans Rudolf Künsch, co-examiner

2014

Summary

Climate extremes such as heat waves, droughts and heavy precipitation events can strongly impact terrestrial ecosystems. They trigger species redistribution and species mortality, but can also cause substantial changes in terrestrial carbon cycling. Interannual changes in terrestrial carbon fluxes largely determine changes in the atmospheric growth rate of CO_2 . Hence, it is important to understand how climate extremes and the carbon cycle are interrelated. Data about climatic variables such as temperature and precipitation are being collected since more than a century and are abundant nowadays with good global coverage. Aided by the continuous investment into scientific satellite missions, also data about vegetation activity and terrestrial carbon fluxes are available for the last three decades, rendering an analysis about the relationship between extreme events in climate and the biosphere at the global scale possible. Data output from terrestrial biosphere models complement those data archives.

This thesis presents an approach to investigate large-scale extreme events in gridded Earth observations. Hereby, Earth observations include meteorological variables such as temperature and water availability, as well as variables describing the state of the biosphere such as Gross Primary Production (GPP), Terrestrial Ecosystem Respiration (TER), Net Ecosystem Exchange (NEE), and fAPAR (fraction of absorbed photosynthetically active radiation). The presented approach aims to, first, detect large-scale spatiotemporally contiguous extreme anomalies to allow a quantification of their overall impact, their spatial and temporal extent, and their spatial distribution on the Earth surface. In a second step, extreme events in impact variables (i.e., in the terrestrial carbon fluxes or fAPAR) are related to concurrent and past conditions of climatic

and other drivers (i.e., temperature, water availability, and fires). To complement the analysis, instantaneous and lagged impacts of extreme events in climatic drivers on terrestrial carbon fluxes are investigated.

The analyses are conducted on gridded datasets of temperature and precipitation, satellite derived fAPAR and fire data, upscaled and modeled GPP, and modeled TER and NEE. Most of the datasets have a $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ spatial and monthly temporal resolution and cover the last 30 years. Furthermore, data about the residual carbon land sink and global estimates of NEE from an inverse model are used.

Overall, large contiguous negative extremes in GPP are mostly found in savannas and grasslands. Hot spots of negative GPP extremes include Caatinga (Brazil), the Pantanal (Brazil), the Great Plains (US), the grasslands connecting Kenya, Tanzania and Uganda (Africa), Highveld (South Africa), the Indus-Ganga Plain (India), and Eastern Australia. Water scarcity is identified as the main cause for negative extremes in fAPAR and extreme decreases in GPP at the global and the continental scale. It is shown that a few extreme events in GPP explain most of the interannual variability in global GPP, which suggests a close relation between the water cycle and global carbon variability. Other drivers for negative GPP extremes at the continental scale include hot temperatures (North America), cold spells (Europe, Oceania), intense precipitation events (South America, Oceania), and fires (Europe, South America and Oceania).

The analysis of extreme events on modeled GPP, TER and NEE reveals that the impact of droughts and heat extremes on the net carbon balance (NEE) are of similar magnitude, both resulting in an anomalous source of carbon to the atmosphere or an anomalous decrease in carbon sink. However, this net impact is driven by different responses of the gross carbon fluxes. Droughts largely decrease GPP, and TER to a smaller extent, such that the GPP impact on NEE is partly compensated by the decrease in TER. Heat extremes, on the other hand, only slightly decrease GPP but largely increase TER, and those

two effects compound each other in their imprint on NEE. The results from the biosphere models also reveal that the compound impact of droughts and heat waves on terrestrial carbon fluxes exceeds the impacts which are expected if droughts and heat waves are analyzed separately. Hence, droughts and heat waves compound each other in their impact on terrestrial ecosystem fluxes.

Zusammenfassung

Klimaextreme wie Hitzewellen, Dürren und Starkniederschläge können terrestrische Ökosysteme nachhaltig beeinflussen. Sie verursachen Neuordnungen von Arten und erhöhte Sterberaten, aber sie können auch substantielle Veränderungen im terrestrischen Kohlenstoffkreislauf auslösen. Zwischenjährige Veränderungen in terrestrischen Kohlenstoffflüssen sind einer der Hauptfaktoren für die Veränderungen in der atmosphärischen CO₂-Wachstumsrate. Es ist daher wichtig zu verstehen, wie Klimaextreme und der Kohlenstoffkreislauf zusammenhängen. Daten über Klimavariablen wie Temperatur und Niederschlag werden seit über hundert Jahren kontinuierlich gesammelt und sind heutzutage mit guter globaler Abdeckung verfügbar. Unter anderem durch immer mehr Satellitenmissionen gibt es aber seit etwa drei Jahrzehnten auch weitverbreitete Daten über Vegetationsaktivität und terrestrische Kohlenstoffflüsse. Diese verschiedenen Datenströme ermöglichen eine Analyse der Zusammenhänge zwischen Extremereignissen in Klima und Biosphäre auf globaler Ebene. Datenoutput von terrestrischen Biosphärenmodellen kompletieren die verfügbaren Datenarchive.

In dieser Dissertation wird ein Verfahren entwickelt, um großskalige Extremereignisse in gerasterten Erdbeobachtungsdaten zu untersuchen. Erdbeobachtungsdaten sind hierbei meteorologische Variablen wie Temperatur und Wasserverfügbarkeit, aber auch Variablen, die den Zustand der Biosphäre beschreiben, wie zum Beispiel Bruttoprimärproduktion (GPP), terrestrische Ökosystematmung (TER), Nettoökosystemaustausch (NEE) und fAPAR (fraction of absorbed photosynthetically active radiation; beschreibt den Anteil an Strahlung, die theoretisch für die Photosynthese verfügbar wäre,

welcher tatsächlich von der Vegetation absorbiert wird). Das vorgestellte Verfahren identifiziert zuerst großskalige raum-zeitlich zusammenhängende extreme Anomalien, um eine Quantifizierung von deren Gesamteinfluss, deren räumlicher und zeitlicher Ausdehnung und deren räumlicher Verteilung auf der Erdoberfläche zu ermöglichen. In einem zweiten Schritt werden Extremereignisse in einer Responsevariable (also in terrestrischen Kohlenstoffflüssen oder fAPAR) mit zeitgleichen und vergangenen Zuständen von Klima- und anderen Treibern (d.h. Temperatur, Wasserverfügbarkeit und Feuer) in Verbindung gebracht. Komplementär zu dieser Analyse werden instantane und verzögerte Effekte von Klimaextremen auf terrestrische Kohlenstoffflüsse untersucht.

Die Analysen werden auf gleichmäßig gerasterten Daten von Temperatur und Niederschlag, von Satelliten abgeleitete Daten über fAPAR und Feuer, hochskaliertem und modelliertem GPP, und modelliertem TER und NEE durchgeführt. Die meisten der Datensätze haben eine räumliche Auflösung von $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ und sind monatlich über die letzten 30 Jahre verfügbar. Weiterhin werden Daten über die übrig bleibende Kohlenstoff-Landsenke und dem globalen Nettokohlenstoffaustausch aus einem inversen Modell verwendet.

Insgesamt kommen große zusammenhängende negative Extremereignisse in GPP hauptsächlich in Savannen und Grünland vor. Hotspots negativer Extreme in GPP finden sich in Caatinga (Brasilien), dem Pantanal (Brasilien), den Great Plains (US), dem Grünland zwischen Kenia, Tansania and Uganda (Afrika), Highveld (Südafrika), der Indus-Ganga Ebene (India), und im östlichen Australien. Die Hauptursache für negative Extremereignisse in fAPAR und extremen Rückgängen in GPP auf globaler und kontinentaler Ebene ist Wassermangel. Es wird gezeigt, dass wenige Extremereignisse in GPP den größten Teil von dessen globaler zwischenjähriger Variabilität erklären können, was auf einen engen Zusammenhang zwischen dem Wasserkreislauf und globaler Kohlenstoffvariabilität schließen lässt. Andere Treiber für negative Extremereignisse in GPP auf kontinentaler Ebene sind hohe Tempera-

turen (Nordamerika), Kälteeinbrüche (Europa, Ozeanien), Starkniederschläge (Südamerika, Ozeanien) and Feuer (Europa, Südamerika and Ozeanien).

Die Analysen von Extremereignissen in modelliertem GPP, TER und NEE zeigen, dass die Auswirkungen von Dürren und Hitzewellen auf den Nettokohlenstoffaustausch (NEE) von ähnlicher Größe sind. Beide Klimaextreme verursachen eine anomale Quelle von Kohlenstoff in die Atmosphäre oder einen anomalen Rückgang einer Kohlenstoffsенке. Diese Auswirkungen auf den Nettokohlenstofffluss resultiert jedoch aus verschiedenen Reaktionen der Bruttoflüsse. Dürren reduzieren GPP stark and TER zu einem kleineren Teil, sodass der GPP-Einfluss auf NEE teilweise durch die Reduktion von TER kompensiert wird. Hitzewellen auf der anderen Seite reduzieren GPP nur wenig, lassen dafür aber TER stark ansteigen. Diese beiden Effekte verstärken sich dann gegenseitig in ihrem Einfluss auf NEE. Die Ergebnisse aus den Biosphärenmodellen veranschaulichen auch, dass die Auswirkungen von gleichzeitig vorkommenden Dürren und Hitzewellen auf terrestrische Kohlenstoffflüsse die Effekte übertreffen, die man bei einer separaten Analyse von Dürren und Hitzewellen erwarten würde. Dürren und Hitzewellen verstärken sich also gegenseitig in ihrem Einfluss auf terrestrische Kohlenstoffflüsse.