



## Vorindustrielle Landwirtschaft: Klimawandel ohne Öl und Kohle

### Autoren

Pongratz, Julia; Reick, Christian H.

### Abteilungen

Land im Erdsystem (Claußen) (Prof. Dr. Martin Claußen)

MPI für Meteorologie, Hamburg

### Zusammenfassung

**Die Vegetationsbedeckung der Kontinente hat entscheidenden Einfluss auf das Klima. Durch die Aufnahme von CO<sub>2</sub> spielen Pflanzen eine zentrale Rolle im globalen Kohlenstoffkreislauf. Zudem beeinflussen sie den Austausch von Energie, Wasser und Impuls zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche. Durch Landnutzung greift der Mensch in diese Prozesse ein. Die hier vorgestellte Studie untersucht die Ausbreitung der Landwirtschaft im letzten Jahrtausend. Es zeigt sich, dass der Mensch schon vor Beginn der Industrialisierung insbesondere auf regionaler Ebene starken Einfluss auf das Klima genommen hat.**

### 1. Einleitung

Heiße Sommer unterscheiden sich hier bei uns in Deutschland von kühlen Sommern um mehrere Grad Celsius. Vor diesem Hintergrund ist uns der weltweite Temperaturanstieg um etwa ein Grad Celsius seit Mitte des 19. Jahrhunderts im Alltag nicht direkt erfahrbar – und würde uns auch nicht weiter beunruhigen, wäre nicht zu befürchten, dass es bei diesem einen Grad in Zukunft nicht bleibt. Selbst moderate Klimaprojektionen gehen mindestens von zwei Grad Erwärmung bis zum Jahr 2100 aus. Damit wären Hitzesommer wie der des Jahres 2003, der – vor allem wegen seines unvorhergesehenen und heftigen Auftretens – massive Ernteaufschläge verursachte und laut Schätzungen mehrere zehntausend Hitzetote zur Folge hatte [1], keine Seltenheit mehr.

Diese weltweite Erwärmung steht in direktem Zusammenhang mit dem Ansteigen der Konzentrationen des Treibhausgases CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre. CO<sub>2</sub> verringert die Durchlässigkeit der Atmosphäre für die Wärmerückstrahlung der Erde, wodurch sich die unteren Luftschichten aufheizen. Durch Kombination verschiedener Methoden lässt sich heutzutage eine Kohlenstoffbilanz der Atmosphäre aufstellen: Im letzten Jahrzehnt des 20. Jahrhunderts wurden jährlich etwa 6,4 GtC (Milliarden Tonnen Kohlenstoff) mit dem aus der Verbrennung fossiler Energieträger (Kohle, Öl, Erdgas) stammenden CO<sub>2</sub> von uns Menschen in die Atmosphäre entlassen. Gleichzeitig stieg der atmosphärische Kohlenstoffgehalt um 3,2 GtC pro Jahr,

während der Ozean jährlich etwa 2,2 GtC aufgenommen hat. Aus diesen Zahlen ergibt sich durch Bildung der Bilanz, dass die weltweiten Kontinente jährlich etwa 1 GtC aufgenommen haben müssen.

Diese Land-Kohlenstoffsene würde man gerne besser verstehen, denn angesichts der Größe dieser Senke – immerhin werden auf diese Weise 15% der fossilen Emissionen jedes Jahr direkt wieder aufgenommen – wird die zukünftige Klimaentwicklung auch von der Entwicklung dieser Senke abhängen. Zudem ist die Größe der Senke zumindest im Prinzip durch den Menschen kontrollierbar, könnte also vielleicht künstlich vergrößert werden, um den zukünftigen atmosphärischen CO<sub>2</sub>-Anstieg zu dämpfen. Deswegen wird am Max-Planck-Institut für Meteorologie in der Abteilung „Land im Erdsystem“ intensiv der Kohlendioxidaustausch zwischen den weltweiten Landmassen und der Atmosphäre untersucht, denn Vegetation spielt bei diesem Austausch eine bedeutende Rolle.

Die Prozesse, welche die Kohlenstoffbindung an Land bestimmen, sind äußerst kompliziert. Hier spielt die Photosynthese der Pflanzen eine wichtige Rolle, bei der CO<sub>2</sub> aus der Atmosphäre aufgenommen wird und der darin enthaltene Kohlenstoff unter Abgabe von Sauerstoff (O<sub>2</sub>) in organischen Verbindungen, z.B. Zucker, gebunden wird. Hierdurch wachsen Pflanzen. Sterben sie ab, so bildet das verwesende Pflanzenmaterial unter Abgabe von CO<sub>2</sub> die weltweiten Böden. Speicherung und Abgabe von CO<sub>2</sub> gehören zu den sogenannten biogeochemischen Wechselwirkungen zwischen Vegetation und Atmosphäre, welche die chemische Zusammensetzung der Atmosphäre verändern. Biogeochemische Wechselwirkungen beeinflussen das Klima global, weil sich gasförmige Spurenstoffe in der Atmosphäre binnen weniger Wochen weltweit verteilen.

Vegetation ist allerdings auch noch in anderer Hinsicht klimarelevant. Den biogeochemischen stehen biogeophysikalische Prozesse gegenüber, die den bodennahen Energie-, Wasser- und Impulsaustausch zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche beeinflussen und die sich vor allem auf das lokale bzw. regionale Klima auswirken. Aus der Vogelperspektive sind Graslandschaften typischerweise heller als z.B. Wälder, man spricht von einer höheren Albedo. Dementsprechend reflektieren erstere Sonnenlicht besser als letztere, erwärmen sich also weniger. Dieser Erwärmung wirkt die Verdunstungskühlung entgegen: Pflanzen brauchen zum internen Nährstofftransport Wasser, das sie über die Wurzeln dem Boden entziehen und durch die so genannten Spaltöffnungen der Blätter in die Atmosphäre verdunsten. Da Bäume oft tiefe Wurzeln besitzen, transportieren Wälder durch diesen Mechanismus mehr Wasser in die Atmosphäre als etwa eine flachwurzelnende Wiese an gleicher Stelle, die Selbstkühlung von Wäldern ist daher stärker als die von Graslandschaften. Welcher Effekt überwiegt, Erwärmung durch Sonneneinstrahlung oder Selbstkühlung durch „Transpiration“, hängt von weiteren Faktoren ab, wie etwa Sonnenstand, Bodenwasserverfügbarkeit, Luftfeuchte oder Pflanzentyp. Über diese Prozesse trägt Vegetation wesentlich zur Ausprägung eines lokalen Klimas bei, das überregional durch die ortstypische mittlere Sonneneinstrahlung, die vorherrschende Windrichtung und den mittleren Niederschlag bestimmt wird.

Die regionale und globale Bedeutung der weltweiten Vegetation für das Klima hat sich im Laufe der letzten Jahrtausende deutlich verändert. Hier spielen einerseits natürliche Klimaveränderungen seit der letzten Eiszeit eine Rolle, in deren Folge sich Ausbreitung und Zusammensetzung der Landvegetation änderten. Der zweite große Einflussfaktor ist der Mensch. Durch Landnutzung, also durch Ackerbau, Forstwirtschaft und Urbanisierung, hat er stark in die natürlichen Austauschprozesse zwischen Atmosphäre und Landbiosphäre eingegriffen. Rechnungen belegen, dass heutzutage etwa 24 Prozent des weltweiten Pflanzenwachstums durch den Menschen kontrolliert werden [2]. Darüber hinaus entstehen durch Landnutzungsänderungen wie etwa der Rodung von Wäldern zur Gewinnung landwirtschaftlicher Flächen zusätzliche CO<sub>2</sub>-Emissionen. Zwar werden große Teile des geschlagenen Holzes oft über Jahre genutzt (Papier), vielleicht sogar über

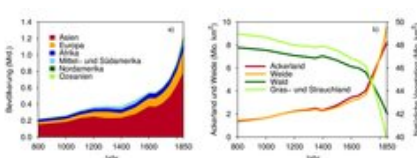
Jahrzehnte oder Jahrhunderte (Gebäude), letztlich landet der darin enthaltene Kohlenstoff aber über kurz oder lang immer als CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, entweder durch Müllverbrennung oder durch langsame Verrottung.

Wie oben erwähnt sind heutzutage die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Energieträger deutlich größer als die Emissionen aus Landnutzungsänderungen. Der gegenwärtig beobachtete weltweite Klimawandel ist daher hauptsächlich durch fossile Emissionen bestimmt. Allerdings sind die fossilen Emissionen erst seit etwa 1950 deutlich größer als die Emissionen aus Landnutzungsänderungen und vor 1850 war die weltweit voranschreitende Ausdehnung der Landwirtschaft die einzige anthropogene Störung des globalen Klimasystems. Die vorindustrielle Zeit eignet sich deswegen besonders gut, um die Folgen der Landnutzung für das Klima zu untersuchen. Ein großes Hindernis war bislang jedoch der Mangel an quantitativen Daten zur Entwicklung der Landwirtschaft in vorindustrieller Zeit und der damit verbundenen Änderung der globalen Vegetationsverteilung. Für das letzte Jahrtausend konnte diese Schwierigkeit kürzlich überwunden werden.

## 2. Rekonstruktion der historischen Vegetationsverteilung

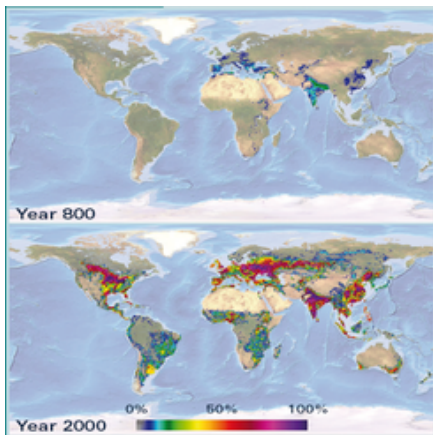
In den Jahrtausenden zwischen 9000 und 5000 Jahren vor heute entwickelten sich Ackerbau und Viehzucht in mindestens fünf Regionen unabhängig voneinander: im Fruchtbaren Halbmond Kleinasiens, in Teilen Chinas und in Mittel- und Südamerika. Von dort breiteten sich Landwirtschaft treibende Kulturen aus und verdrängten nach und nach die geschichtlich älteren Jäger- und Sammlergesellschaften. Leider gibt es kaum genaue Aufzeichnungen darüber, wie viel Fläche in welcher Region zu welcher Zeit unter landwirtschaftliche Nutzung gebracht wurde. Man muss sich deshalb anderer Informationsquellen bedienen. Gut geeignet sind Bevölkerungsdaten, die wesentlich besser dokumentiert sind als landwirtschaftliche Flächen; zu den wichtigsten Quellen zählen Kirchenbücher und Volkszählungen, die in vielen Regionen von den Herrschern durchgeführt wurden, um die Zahl der steuer- oder militärdienstpflichtigen Personen zu bestimmen. Für fast alle Regionen der Erde konnte aus solchen Quellen die Bevölkerungsentwicklung mehrere Jahrtausende in die Vergangenheit zurückverfolgt werden. Größe der Bevölkerung und landwirtschaftlich genutzte Fläche hängen eng zusammen. Vor der industriellen Revolution war Fernhandel auf wertvolle Güter wie etwa Gewürze beschränkt, Grundnahrungsmittel konnten kaum in ausreichender Menge über größere Entfernungen transportiert werden. Deswegen kann für die Zeit seit dem Mittelalter bis zur industriellen Revolution von der regionalen Größe der Bevölkerung auf die benötigte landwirtschaftliche Fläche geschlossen werden. Dieser Zusammenhang wurde am Max-Planck-Institut für Meteorologie genutzt, um einen Datensatz zu erarbeiten, der weltweit konsistent die Verteilung von Acker- und Weideflächen seit dem Jahr 800 nachzeichnet [3]. Dabei wurden Unsicherheiten bezüglich der Bevölkerungsdaten und der Einfluss von sich ändernden Agrartechniken berücksichtigt. Um auch den Einfluss der landwirtschaftlichen Expansion auf die Verteilung von Wäldern und natürlichen Gras- und Strauchlandschaften zu bestimmen, wurde die Rekonstruktion landwirtschaftlicher Flächen mit einer Karte der natürlichen Vegetationsverbreitung kombiniert.

In den **Abbildungen 1b** und **2** sind Ergebnisse dieser Rekonstruktion dargestellt: Bereits in vorindustrieller Zeit ist der menschliche Einfluss in der Abnahme der natürlichen Vegetation zugunsten der Ausdehnung von Acker- und Weideflächen deutlich zu erkennen.



a) Bevölkerungsentwicklung 800-1850 (Daten: McEvedy und Jones [4]). b) Globale Flächenentwicklung verschiedener Vegetationstypen 800-1850. Mit dem Anstieg der Weltbevölkerung wurden schon in vorindustrieller Zeit weite Flächen natürlicher Vegetation in landwirtschaftliche Flächen umgewandelt.

© Max-Planck-Institut für Meteorologie



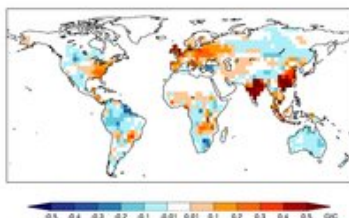
Ackerland im Jahr 800 und 2000 [3]. Angaben in Prozent der Landoberfläche.

© Deutsches Klimarechenzentrum / Max-Planck-Institut für Meteorologie

Diese Rekonstruktion ist die Grundlage der im Folgenden vorgestellten Untersuchung zum Einfluss des Menschen auf das Klima der vorindustriellen Zeit. Gerade das durch die Rekonstruktion erschlossene letzte Jahrtausend ist in dieser Hinsicht besonders interessant: Zwischen 800 und dem frühen 18. Jahrhundert verdreifachte sich die Weltbevölkerung auf eine Milliarde Menschen (**Abb. 1a**). Das letzte Jahrtausend muss deshalb mit einer landwirtschaftlichen Expansion von nie zuvor dagewesener Stärke einhergegangen sein. Ist in diesem Zeitraum kein anthropogenes Klimasignal nachzuweisen, so ist auch für die vorangegangenen Jahrtausende keines zu erwarten – der Einfluss des Menschen auf das Klima hätte dann – wie auch meist angenommen – erst mit der massenhaften Verfeuerung von Öl und Kohle während der industriellen Revolution begonnen. Die hier vorgestellte Studie kommt allerdings zu einem anderen Ergebnis.

### 3. Der Einfluss des Menschen auf das Klima der vorindustriellen Zeit

Klimamodelle erlauben es uns heute, die Wechselwirkungen zwischen Vegetation, Atmosphäre und Ozean über lange Zeiträume auf Großrechnern zu simulieren. Mithilfe des am Max-Planck-Institut für Meteorologie entwickelten Erdsystemmodells und oben beschriebener Landnutzungsrekonstruktion ist es möglich abzuschätzen, wie sich der Kohlenstoffkreislauf und das Klima durch den Einfluss der Landwirtschaft zeitlich und räumlich im letzten Jahrtausend verändert haben.

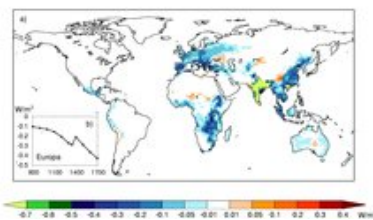


Änderung des Kohlenstoffspeichers der terrestrischen Biosphäre zwischen 800 und 1850. Besonders die landwirtschaftlich wichtigen Regionen verlieren Kohlenstoff (C) vom Land in die Atmosphäre (positive Werte), während viele ungestörte Regionen eine leichte Aufnahme von Kohlenstoff zeigen.

© Max-Planck-Institut für Meteorologie

**Abbildung 3** zeigt die Änderungen des berechneten Kohlenstoffgehalts der Landbiosphäre im Zeitraum 800 bis 1850. Deutlich sind die Zentren der historischen Landwirtschaft in Europa, Indien und China zu erkennen,

wo Entwaldung infolge der landwirtschaftlichen Ausdehnung zu einem Verlust von Kohlenstoff führte. Überraschenderweise zeigen von landwirtschaftlicher Expansion nicht betroffene Gebiete eine deutliche Aufnahme von Kohlenstoff. Hier wirkt das menschliche Handeln indirekt: Die Emissionen aus den Landnutzungsänderungen führen weltweit zu einer Erhöhung des atmosphärischen  $\text{CO}_2$ , die sich günstig auf das Pflanzenwachstum auswirkt. Trotz dieser Rückspeicherung der Emissionen aus Landnutzungsänderungen ist der Gesamteffekt der landwirtschaftlichen Entwicklung ein Verlust von etwa 28 GtC in der vorindustriellen Zeit des letzten Jahrtausends. Obwohl der Ozean einen Teil der Emissionen aufnimmt, erhöht sich das atmosphärische  $\text{CO}_2$  langsam und erreicht im 16.-18. Jahrhundert Abweichungen vom natürlichen Wert, die nicht mehr allein durch natürliche Klimaschwankungen erklärbar sind. Zwar erst spät, aber noch vor der Industrialisierung scheint der Mensch also die  $\text{CO}_2$ -Konzentration der Atmosphäre erhöht zu haben. Dieser  $\text{CO}_2$ -Anstieg ist allerdings zu gering, um die Temperatur global merklich zu ändern.



a) Änderung der kurzwelligen Strahlungsbilanz (ausgedrückt in Änderung der Nettoenergieflussdichte [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] am Oberrand der Atmosphäre) für das Jahr 800 als direkte Folge der Albedoänderung durch Landwirtschaft. b) Änderung der Strahlungsbilanz gemittelt über die Fläche Europas von 800 bis 1700.

Auf regionaler Ebene ergibt sich ein deutlicheres Bild eines frühen anthropogen verursachten Klimawandels. Simulationen zeigen, dass bereits vor über tausend Jahren die Energiebilanz einiger Regionen verändert wurde, weil sich mit der Landnutzung auch die Albedo der Landoberfläche gewandelt hat (**Abb. 4a**) [5]. Besonders in Europa, Indien und China zeigt sich eine Abnahme der aufgenommenen Sonneneinstrahlung bis zwei Watt pro Quadratmeter. Eine solche Änderung ist lokal von der gleichen Stärke wie der gegenwärtige Treibhauseffekt, allerdings mit entgegengesetztem Vorzeichen. Auch wenn solch kleinskalige Effekte die globalen Temperaturen kaum beeinflussen, kann sich das regionale Klima dadurch doch deutlich verändert haben. Sogar geschichtliche Ereignisse können sich durch solche biogeophysikalischen Effekte regional auf das Klima durchpausen: **Abbildung 4b** zeigt die Veränderung der Energiebilanz Europas im Verlauf des Mittelalters. Deutlich sichtbar ist eine Schwächung des ansonsten wachsenden menschlichen Einflusses im 14. Jahrhundert – hervorgerufen durch die Pestepidemie, der etwa ein Drittel der Bevölkerung zum Opfer fiel und in deren Folge weite landwirtschaftliche Flächen zeitweise aufgegeben wurden. Ähnliche Folgen hatten der Einfall der Mongolen im 13. Jahrhundert in China und die mit der Invasion der Europäer eingeschleppten Krankheiten bei den Hochkulturen Amerikas. Beispiele wie diese zeigen, wie wichtig eine räumlich und zeitlich gut aufgelöste Landnutzungsrekonstruktion für Klimastudien ist, um der regional so unterschiedlich verlaufenden landwirtschaftlichen Geschichte Rechnung tragen zu können.

## 4. Ausblick

Die Klimawirkung der Landnutzung in der Vergangenheit zu untersuchen dient nicht nur einem besseren Prozessverständnis. Die Geschichte der Landwirtschaft mit ihren Auswirkungen auf das Klimasystem zu quantifizieren ist auch deshalb relevant, weil sie auf das heutige und zukünftige Klima weiterwirkt. Zum einen zeigen die oben skizzierten Ergebnisse, dass die Menschheit schon mit einer gewissen Vorbelastung in die industrielle Zeit eingetreten ist: Schon in vorindustrieller Zeit wurde die Energiebilanz regional

verändert, der atmosphärische CO<sub>2</sub>-Gehalt angehoben und somit das Potenzial für den Klimawandel der industriellen Zeit erhöht. Zum anderen wurde Wiederaufforstung zu einer wichtigen Maßnahme erklärt, um den gegenwärtigen Klimawandel abzuschwächen [6]. Besonders in den mittleren Breiten wurden im Zuge der Globalisierung und des technischen Fortschritts landwirtschaftliche Flächen frei, deren Wiederaufforstung, so die Hoffnung, der Atmosphäre CO<sub>2</sub> entziehen würde. Doch auch hier muss die Komplexität der Prozesse beachtet werden: Studien [7 - 9] zeigen, dass in den mittleren und hohen Breiten durch die Wiederbewaldung die Albedo so stark gesenkt und dadurch so viel mehr Sonnenstrahlung aufgenommen würde, dass der abkühlende Effekt der CO<sub>2</sub>-Aufnahme nicht zum Tragen käme. In den Tropen hingegen spielt die hohe Verdunstung der Wälder eine größere Rolle und wirkt, wie die CO<sub>2</sub>-Aufnahme, kühlend. Die tropische Entwaldung zu stoppen – jährlich wird eine Fläche von zweimal der Größe Bayerns gerodet, zum großen Teil für landwirtschaftliche Zwecke [10] – mag deshalb die wirkungsvollere Maßnahme gegen den Klimawandel darstellen. Die Entwicklung des Klimas wird also auch in Zukunft von landwirtschaftlichen Entscheidungen abhängen.

## Originalveröffentlichungen

1. **J.-M. Robine, S. L. Cheung, S. Le Roy, H. Van Oyen, F. R. Herrmann:**

Report on excess mortality in Europe in Summer 2003.

2003 Heat Wave Project, EU Community Action Programme for Public Health, Grant Agreement 2005114 (2007).

2. **H. Haberl, K. H. Erb, F. Krausmann, V. Gaube, A. Bondeau, C. Plutzer, S. Gingrich, W. Lucht, M. Fischer-Kowalski:**

Quantifying and mapping the human appropriation of net primary production in earth's terrestrial ecosystems.

Proceedings of the National Academy of Sciences **104** (31), 12942-12945 (2007).

3. **J. Pongratz, C. Reick, T. Raddatz, M. Claussen:**

A reconstruction of global agricultural areas and land cover for the last millennium.

Global Biogeochemical Cycles **22**, GB3018, doi: 10.1029/2007GB003153 (2008).

4. **C. McEvedy, R. Jones:**

Atlas of World Population History.

Penguin Books, Harmondsworth, 368 Seiten (1978).

5. **J. Pongratz, T. Raddatz, C. H. Reick, M. Esch, M. Claussen:**

Radiative forcing from anthropogenic land cover change since A.D. 800.

Geophysical Research Letters **36**, GL02709, doi: 10.1029/2008GL036394 (2009).

6. **G. J. Nabuurs, O. Masera, K. Andrasko, P. Benitez-Ponce, R. Boer, M. Dutschke, E. Elsidig, J. Ford-Robertson, P. Frumhoff, T. Karjalainen, O. Krankina, W. A. Kurz, M. Matsumoto, W. Oyhantcabal, N. H. Ravindranath, M. J. Sanz Sanchez, X. Zhang:**  
Forestry.  
In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA (2007).
  
7. **M. Claussen, V. Brovkin, A. Ganopolski:**  
Biogeophysical versus biogeochemical feedbacks of large-scale land cover change.  
Geophysical Research Letters **28** (6), 1011-1014 (2001).
  
8. **G. Bala, K. Caldeira, M. Wickett, T. J. Phillips, D. B. Lobell, C. Delire, A. Mirin:**  
Combined climate and carbon-cycle effects of large-scale deforestation.  
Proceedings of the National Academy of Sciences **104** (16), 6550-6555 (2007).
  
9. **R. A. Betts, P. D. Falloon, K. Klein Goldewijk, N. Ramankutty:**  
Biogeophysical effects of land use on climate: Model simulations of radiative forcing and large-scale temperature change.  
Agricultural and Forest Meteorology **142**, 216-233 (2007).
  
10. **FAO - Food and Agriculture Organization:**  
Global Forest Resources Assessment 2000. Main Report.  
FAO Forestry Paper No. **140**, FAO, Rome, Italy.