

Vegetation und ihre Wechselwirkungen mit dem globalen Klima

Martin Claussen

Max-Planck-Institut für Meteorologie und Universität Hamburg, Bundesstr. 53
20146 Hamburg

(Beitrag zum Buch „Zukunft des Klimas“, siehe Anmerkung am Ende des Beitrages)

Um das Klima auf unserer Erde zu beschreiben, wird oftmals die Wirkung des Klimas auf das Leben, insbesondere die Pflanzenwelt betrachtet. So bezeichnete Wladimir Köppen¹ die Vegetation als “kristallisiertes, sichtbar gewordenes Klima..., in dem sich so manche Züge deutlicher zeigen als in den Angaben unserer Instrumente.” Doch ist Vegetation wirklich nur ein Klimaindikator? Alexander von Humboldt schreibt 1845 in seinem Kosmos – Entwurf einer physischen Weltbeschreibung²: „Das Wort Klima bezeichnet allerdings zuerst eine spezifische Beschaffenheit des Luftkreises; aber diese Beschaffenheit ist abhängig von dem perpetuierlichen Zusammenwirken einer all- und tiefbewegten, durch Strömungen von ganz entgegengesetzter Temperatur durchfurchten Meeresfläche mit der wärmestrahrenden trockenen Erde, die mannigfaltig gegliedert, erhöht, gefärbt, nackt oder mit Wald und Kräutern bedeckt ist.“ Dieses Bild entspricht der modernen Klimaforschung, die Klima nicht nur als Wetterstatistik versteht, sondern im weiteren Sinne als Eigenschaft eines komplexen Systems begreift, das die Atmosphäre, den Ozean sowie das Land einschließlich der marinen und terrestrischen Biosphäre umfasst³. Wie wichtig ist nun die Vegetation in diesem System aus der Sicht eines Klimaphysikers? Wie stark ändert sich das Klima mit der Wechselwirkung zwischen der Vegetation und den anderen Systemkomponenten?

VEGETATION – DAS GROSSE FLIEGENGEWICHT

Ein Vergleich der Massen von Atmosphäre, Ozean und terrestrischer Biosphäre zeigt, dass letztere (im Wesentlichen die lebende Biomasse der Vegetation, die Biomasse abgestorbener Blätter, Zweige und Wurzeln im Boden) ein „Fliegengewicht“ im Vergleich zu den anderen Klimasystemkomponenten ist. Rund 500 Milliarden Tonnen Kohlenstoff sind in der Vegetation gebunden und gut 1500 Milliarden Tonnen in den Böden. Damit ist die terrestrische Biosphäre etwa tausend mal weniger reich an Masse als die gasförmige Atmosphäre - nicht zu reden von dem Ozean und der festen Erde, die gut eine Million bzw. eine Milliarde mal mehr Masse aufweisen als die terrestrische Biosphäre. Da die Fähigkeit, Energie zu speichern, proportional mit der Masse wächst, kann also die Vegetation bei der Betrachtung der globalen Energiespeicherung im Klimasystem vernachlässigt werden. Auch für den globalen Drehimpulshaushalt des Klimasystems ist die terrestrische Biosphäre nur aus akademischer Sicht interessant. Studenten der Klimaphysik können die Änderung der Rotationsgeschwindigkeit der Erde ausrechnen, die durch den Jahresgang des Blattaustriebs der Wälder erzeugt wird. Diese Änderung ist noch viel geringer als die wenigen Millisekunden Unterschied im Jahresgang der Erdrotation, die der festen Erde durch die sich jahreszeitlich ändernde globale Zirkulation der Atmosphäre aufgeprägt wird.

Obwohl die Vegetation nur ein „Fliegengewicht“ im globalen Klimageschehen ist, wirkt sie doch auf das Klima und zwar im Wesentlichen dadurch, dass sie den Energie-, Im-

puls- und Stoffaustausch zwischen Atmosphäre und Landoberfläche beeinflusst. Tatsächlich ist die Fläche, mit der die Vegetation in Kontakt zur Atmosphäre steht, erstaunlich groß. Mit sämtlichen Blättern aller Pflanzen könnte nahezu die gesamte Erdoberfläche, Kontinente und Ozeane, bedeckt werden.

Wie funktionieren die Austauschprozesse zwischen Vegetation bzw. Böden und der Atmosphäre im Mittel über große Regionen? Beim Impulsfluss ist die Rechnung einfach: die rauere Vegetation zieht mehr Impuls aus der Atmosphäre als der natürliche, unbewachsene, flache Boden. Damit wird der Wind über Vegetation stärker abgebremst als über einer flachen Wüste.

Der Energieaustausch ist komplexer ⁴ (Abbildung 1): Auf Satellitenbildern erscheinen Waldflächen sehr dunkel, Grasflächen etwas heller und Wüsten oder gar Eismassen sehr hell. Vegetation reflektiert Sonnenstrahlung im geringeren Maße und absorbiert Sonnenstrahlung daher stärker als unbewachsene Böden - mit Ausnahme von dunklen Schwarzerden, die stärker durch die Sonne aufgeheizt werden können als Wälder und Steppen. In schneebedeckten Regionen verbergen sich unter den vom Flugzeug oder Satelliten aus dunkler erscheinenden Flächen im Allgemeinen schneebedeckte Wälder, während flache Tundravegetation oder die Polarwüste vollständig vom hellen Schnee bedeckt werden.

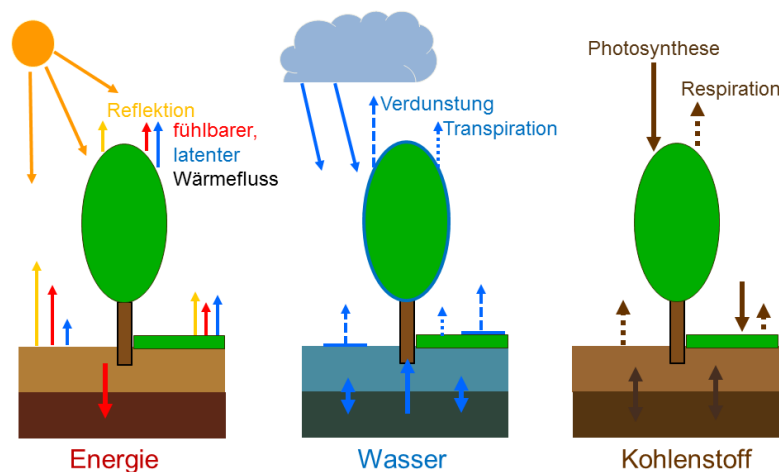


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Energieflüsse, Verdunstung, Transpiration und Kohlenstoffflüsse über der Vegetation im Vergleich zum unbewachsenen Boden. Nur die für die großflächige Wechselwirkung zwischen Vegetation und Klima wichtigen Prozesse sind dargestellt. Auf die detaillierte Betrachtung des Mikroklimas in einem Vegetationsbestand wurde verzichtet.

Die durch Bodenwärme, solare Einstrahlung und Wärmeausstrahlung des Bodens verfügbare Energie an der Grenzfläche zwischen Atmosphäre und Erdoberfläche wird durch die Flüsse fühlbarer und latenter Wärme an die Atmosphäre abgegeben. Die latente, gewissermaßen „versteckte“ Wärme wird bei Phasenumwandlung des Wassers, also bei Verdunstung oder Kondensation, aufgenommen oder freigesetzt. Je mehr Wasser verdunstet, desto weniger fühlbare Wärme steht zur Verfügung und die bodennahe Luftschicht kühlt sich ab.

Das Verhältnis von fühlbarer Wärme und latenter Wärme unterscheidet sich deutlich über Vegetation und unbewachsenen Böden. Aufgrund ihrer großen Oberfläche verdunstet wesentlich mehr Wasser nach einem Regenguss aus der Vegetation als über dem flachen Boden oder einem See. Dafür ist der „Waldrauch“, also der Nebel, der nach einem starken Regenguss aus dem Wald emporsteigt, ein schönes Beispiel. Die unterschiedliche Verdunstung und Transpiration wirken nicht nur in Bodennähe. Sie ändern auch die Wolkenbildung und damit die Energieumsätze in der gesamten Atmosphäre über der Vegetation.

Der Kohlenstoffkreislauf hängt eng mit dem Energie- und Wasserkreislauf zusammen, denn Pflanzen wachsen im Wesentlichen aus der Luft. Sie atmen Kohlendioxid aus der Atmosphäre durch mikroskopische Öffnungen in ihren Blättern ein. Durch diese Öffnungen transpirieren die Pflanzen aber auch, verlieren also Wasser an die Atmosphäre. Die Pflanzen können die Blattöffnungen den Umweltbedingungen anpassen, um Kohlenstoffaufnahme und Wasserverlust so kostengünstig wie möglich zu regeln.

CO₂ wird nicht nur durch Photosynthese aufgenommen, sondern auch über Respiration der Blätter vor allem nachts wieder abgegeben. Ferner werden das Laub auf den Böden und der Kohlenstoff der Biomasse im Boden von Bakterien zersetzt, so dass der so freigesetzte Kohlenstoff wieder als CO₂ in die Atmosphäre gelangt. Da sich CO₂ relativ rasch in der gesamten Atmosphäre verteilt, verändern Photosynthese und Respiration nicht nur den globalen Kohlenstoffkreislauf, sondern auch den Treibhauseffekt und damit den globalen Energiehaushalt der Atmosphäre. So kann die Vegetation das globale Klima beeinflussen, selbst das Klima über dem Ozean oder über den Landflächen, die nicht direkt von Vegetationsänderungen betroffen sind.

DER WALD – JANUSKOPF IM GLOBALEN KLIMA

Energie-, Wasser- und Kohlenstoffflüsse über den verschiedenen Vegetationsbeständen und den unbewachsenen Böden beeinflussen das Klima also in sehr unterschiedlicher Weise. Manche Prozesse kühlen die bodennahe Luft eher ab, andere erwärmen sie hingegen. Welcher Effekt gewinnt in diesem komplexen Spiel der Wechselwirkungen die Oberhand?

Um die Wirkung von Prozessen in einem System zu verstehen, werden in der Physik häufig „Störungsexperimente“ durchgeführt. Das System wird aus einem Gleichgewichtszustand heraus verschoben, um die Reaktion des Systems auf diese Störung zu analysieren. Genau so lässt sich die Wechselwirkung der Vegetation im globalen Klimasystem erkunden. Dies geschieht mit einem Klimamodell, das die Zirkulation der Atmosphäre und des Ozeans sowie die Verteilung der Vegetationszonen interaktiv zu berechnen gestattet. Dazu werden in einer ersten Simulation sämtliche Tropenwälder zwischen etwa 19°S und 15°N und in einem zweiten Experiment sämtliche Wälder nördlich von 45°N entfernt⁵. Diese Experimente zeigen, dass Tropenwälder und boreale Wälder im globalen Klima im Wesentlichen entgegengesetzt wirken (Abbildung 2). Warum?

Werden im Klimamodell die Tropenwälder entfernt, nimmt die Reflexion von Sonnenstrahlung in diesen Regionen in den meisten Fällen zu, was dort zur Abkühlung führen sollte. Gleichzeitig jedoch werden Verdunstung und Transpiration herabgesetzt. Der fühlbare Wärmefluss nimmt wegen des verminderten latenten Wärmeflusses zu, die entwaldete Region wird wärmer. Ferner nimmt mit der verminderten Verdunstung und Transpiration die Bewöl-

kung ab, so dass Sonnenstrahlung weniger stark in den Weltraum reflektiert wird. Auch dies verstärkt die lokale Erwärmung. Gleichzeitig verringert der verminderte Wasserdampffluss in die Atmosphäre das Treibhausgas Wasserdampf, was zur Abkühlung führt, die jedoch durch den Treibhauseffekt des CO_2 , das bei Brandrodung sofort oder durch Verwitterung etwas später freigesetzt wird, überkompensiert wird. Durch weitere Wechselwirkungsprozesse im globalen Klimasystem, z.B. einem zusätzlichen Abschmelzen von Meereis in der Barentssee, kann, wie in der Abbildung 2 zu sehen ist, die Temperatur auch in entfernten Regionen, die nicht direkt von der Entwaldung betroffen sind, deutlich steigen.

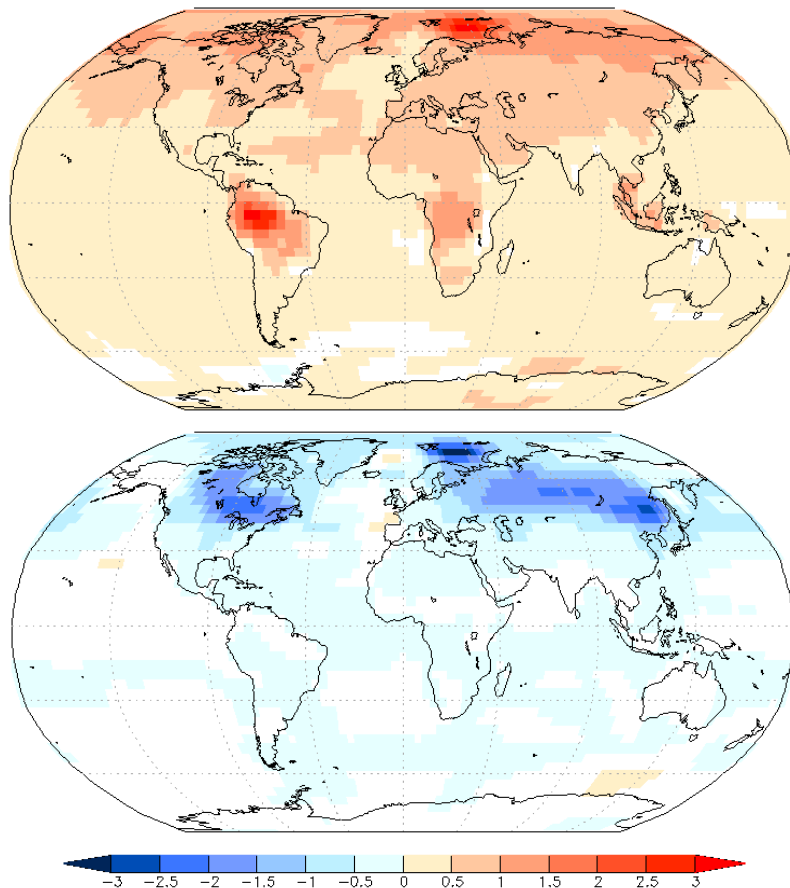


Abbildung 2: Änderung der bodennahen Jahresmitteltemperatur durch vollständige Abholzung der Tropenwälder zwischen etwa 19°S und 15°N (oben) und durch vollständige Abholzung der Wälder nördlich von 45°N (unten). Im globalen Mittel beträgt die Erwärmung bei Abholzung tropischer Wälder etwa $+0.4^{\circ}\text{C}$, die Abkühlung bei Entwaldung der nördlichen Breiten etwa -0.25°C . Diese Rechnungen wurden von Bathiany und anderen⁵ durchgeführt.

Bei einer vollständigen Entwaldung der Kontinente nördlich von 45°N sieht dies anders aus. Der Umsatz von Kohlenstoff in der Taiga ist kleiner als der in den Tropen, so dass der Effekt der Zunahme der Reflektion von Sonnenstrahlung durch Entwaldung gerade in den Jahreszeiten, in denen die Landoberfläche schneebedeckt ist, überwiegt. Insgesamt kühlt sich das Klima trotz eines verstärkten Treibhauseffekts durch Erhöhung der atmosphärischen CO_2 -Konzentration in fast allen Regionen der Welt ab. Modellexperimente, in denen umgekehrt sämtliche tropischen Landflächen bzw. sämtliche Landflächen nördlich von 45°N , die nicht

bewaldet sind, aufgeforstet werden, zeigen das komplementäre Bild⁵. Aufforstung in den Tropen führt zu einem Temperaturrückgang, Aufforstung der Landflächen in den gemäßigten und hohen nördlichen Breiten zu einem Temperaturanstieg.

Die hier gezeigten Resultate stimmen zumindest qualitativ mit den Ergebnissen ähnlicher Klimasimulationsexperimente mit anderen Klimamodellen überein. Generell gilt daher, dass Tropenwälder das Klima eher abkühlen, die Wälder der gemäßigten und vor allem der hohen nördlichen Breiten es dagegen eher erwärmen. Dabei führt ausgedehnte Entwaldung und Aufforstung zu regional starken Klimaeffekten. Die Änderung der globalen Mitteltemperatur ist hingegen eher klein, nur wenige Zehntel Grad selbst bei vollständiger Abholzung oder Aufforstung in den Tropen oder der Landflächen nördlich von 45°N.

VEGETATION UND EISZEITEN

Drastisches Aufforsten oder Abholzen von Wäldern bewirken im globalen Mittel nur eine relativ geringe Erwärmung oder Abkühlung. Spielt die Vegetation im globalen Klimageschehen also keine nennenswerte Rolle? Ein Blick auf die Klimaänderungen der letzten Jahrhunderttausende, in denen Eiszeiten mit wärmeren Klimaphasen wechselten, relativiert diese Vermutung.

Abschätzungen der Vegetationsänderungen zwischen der Hochphase der letzten Eiszeit, also dem letzten großen Vorstoß der Eismassen vor gut 21000 Jahren, dem so genannten Klimaoptimum des mittleren Holozäns vor gut 9000 bis 6000 Jahren und dem heutigen Klima (Abbildung 3) ergeben während der Eiszeit eine deutliche Verschiebung der Taiga nach Süden und eine Verringerung dieser Waldfläche auf fast die Hälfte der heutigen Bestandsfläche. Boreale Wälder waren in diesen Breiten nicht mehr der dominante Vegetationstyp. Im Vergleich zu den Wäldern der Taiga sind die Wälder der Tropen in der Eiszeit nur relativ geringfügig ausgedünnt worden. Während des mittleren Holozäns war die Erde dagegen grüner als heute. Die Baumgrenze im hohen Norden wanderte einige hundert Kilometer nach Norden. Auch die Sahara war deutlich grüner, doch war sie sehr wahrscheinlich nicht vollständig bewaldet. Teile der Sahara waren eher mit einer Strauch-Savanne bedeckt, nur entlang der Flüsse und an Seen traten Galeriewälder auf.

Diese Vegetations- und Klimaänderungen wurden und werden durch allmähliche, periodische Änderungen der Erdbahn um die Sonne, welche zu einer Verschiebung der Einstrahlung auf der Erde führt, angeregt. Wechselwirkungsprozesse, insbesondere die Bildung großer Eismassen auf dem nordamerikanischen Kontinent und Skandinavien verstärken die einstrahlungsbedingten Klimaänderungen. Der globale Temperaturunterschied zwischen dem heutigen Klima und dem Eiszeitklima wird auf etwa 4 bis 6°C geschätzt. Nach dem oben erläuterten Prinzip „Tropenwälder = Abkühlung, Taigawälder = Erwärmung des Klimas“, müsste der im Vergleich zur Änderung der Tropenwälder starke Rückgang der borealen Wälder zu dieser Abkühlung beigetragen haben. Umgekehrt dürfte das Wandern der Baumgrenze nach Norden das Klima während der Warmphase vor einigen tausend Jahren noch ein wenig stärker erwärmt haben.

Verschiedene Rechnungen mit Klimamodellen zeigen tatsächlich, dass der starke Rückgang der Taiga dort, wo die Wälder verschwunden sind, eine deutliche Abkühlung von mehreren Grad Celsius im Jahresmittel ausmachten, wenn man lediglich die Änderungen der

bodennahen Energieflüsse auf die bodennahe Temperatur berücksichtig und den Einfluss der großflächigen Vergletscherung herausrechnet. In anderen Regionen der Welt sind die Temperaturunterschiede eher gering. Im globalen Mittel ergibt sich insgesamt eine zusätzliche vegetationsbedingte Abkühlung von wenigen Zehnteln Grad Celsius. In den Rechnungen für das mittlere Holozän macht sich der Unterschied zwischen einem Klima mit heutiger Vegetation und einer dem Klima des mittleren Holozän angepassten Vegetationsverteilung am stärksten in den betroffenen Regionen im Frühjahr bemerkbar, während sie im Jahresmittel kaum zu Buche schlägt.

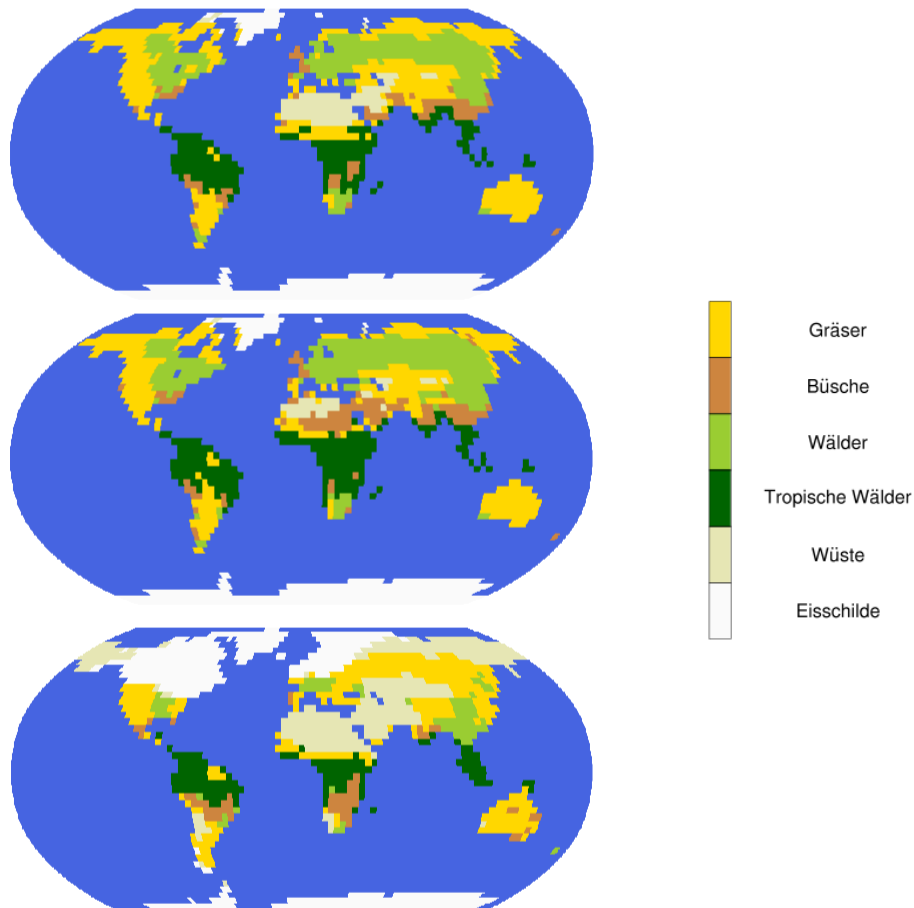


Abbildung 3: Berechnete dominante Vegetationstypen im heutigen Klima (obere Abbildung), im so genannten Klimaoptimum des mittleren Holozäns vor gut 6000 Jahren (mittlere Abbildung) und während der Hochphase der letzten Eiszeit vor rund 21000 Jahren (untere Abbildung). Diese Abbildungen wurden von Ulrike Port, Max-Planck-Institut für Meteorologie, aus verschiedenen Klimasimulationen des Instituts erstellt.

Der Effekt der Vegetationsverschiebung auf den Kohlenstoffkreislauf ist nur schwer abzuschätzen. Der Rückgang der Wälder und damit des in der lebenden Biomasse gespeicherten Kohlenstoffs sollte eigentlich zum Anstieg der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre beim Übergang in eine Eiszeit geführt haben. Tatsächlich jedoch betrug die CO₂-Konzentration während der Hochphase der letzten Vereisung nur etwa 2/3 des Wertes während der Warmzeiten davor und danach. Vermutlich hat der Ozean einen Großteil des Koh-

lenstoffs aus den Wäldern aufgenommen. Ein erheblicher Teil des Kohlenstoffs wurde wahrscheinlich auch im Permafrost gebunden⁶. Dieser Teil des globalen Kohlenstoffkreislaufes ist bisher nur zum Teil verstanden, so dass Abschätzungen dieses Effektes in der Literatur divergieren.

Wie schon im Gedankenexperiment der großflächigen Entwaldung in den Tropen und Taiga beschrieben, ändert die Dynamik der Vegetationszonen beim Wechsel von Warm- und Eiszeiten im Wesentlichen das Klima in den Regionen, die von der Vegetationsänderung betroffen sind. Im globalen Mittel beträgt der Effekt nur knapp ein Zehntel des globalen Temperaturunterschieds zwischen Eiszeit und Warmzeit. Allerdings geht der Effekt stets in die gleiche Richtung: Vegetation verstärkt anscheinend den Klimawandel zwischen Eiszeiten und Warmzeiten⁷.

VEGETATION UND WÜSTE: DIE GRÜNE SAHARA

Die Sahara spielt im globalen Klimasystem eine besonders interessante Rolle. Wie bereits erwähnt, war die Sahara vor einigen tausend Jahren deutlich grüner als heute. Funde von Pflanzen- und Holzresten sowie von jungsteinzeitlichen Felsbildern in den heute hyperariden Gebieten der Sahara belegen, dass die Sahelzone vor rund 10000 Jahren nach Norden mindestens bis zum nördlichen Wendekreis wanderte und vor gut 5000 Jahren wieder nach Süden. Wie für das Kommen und Gehen der Eismassen, so gibt die Änderung der Erdbahn um die Sonne und die damit einhergehende Verschiebung der Einstrahlung auf der Erde den Anstoß auch für das Ausdehnen und Zusammenziehen der Sahara. So erhielt die Nordhemisphäre im mittleren Holozän im Sommer bis zu 10% mehr Energie durch solare Einstrahlung als heute. Dadurch verstärkte sich der Jahresgang der Temperatur auf den Nordkontinenten. Insbesondere war der Temperaturunterschied zwischen Kontinent und Ozean im Sommer größer als heute, was im mittleren Holozän zu einem kräftigeren Sommermonsun führte.

Die Zunahme des Westafrikanischen Sommermonsuns und die daraufhin einsetzende Wechselwirkung zwischen Vegetation, Strahlungshaushalt und Monsundynamik ließ die Sahara deutlich schrumpfen. Diesen Prozess können sämtliche Klimamodelle im Prinzip nachbilden, wenn auch die Ergebnisse der Modelle sich im Detail deutlich unterschieden. Weitere Experimente mit verschiedenen Klimamodellen zeigen, dass die durch die Änderung der Erdbahn bedingte Zunahme des Westafrikanischen Monsuns allein betrachtet nur zu einer marginalen Verschiebung der Sahelzone geführt haben dürfte. Warum ist die Wechselwirkung zwischen Vegetation und Klima in der Sahara so ausgeprägt?

Die Sahara ist eine Anomalie im Klimasystem. Während die Tropen im Allgemeinen mehr Energie durch die Sonneneinstrahlung erhalten als sie durch Wärmeabstrahlung des Bodens und der Atmosphäre verlieren, ist die Strahlungsbilanz über der Sahara im Jahresmittel negativ. Die helle Wüste reflektiert einen erheblichen Teil der Sonnenstrahlung, in manchen Regionen wie der Bodélé-Niederung im Tschad bis zu 50 Prozent. Gleichzeitig wird wegen der geringen Bewölkung Wärme in größerem Maße in den Weltraum abgestrahlt als in den dicht bewölkten inneren Tropen. Die Sahara ist, energetisch betrachtet, also eine Kältequelle für die Atmosphäre. Dies führt zu einem Zusammenströmen von Luft oberhalb der Sahara und einem Absinken von Luft über der Sahara. Durch die Erwärmung der Luft beim Absinken wird das strahlungsbedingte Wärmedefizit ausgeglichen. Gleichzeitig behindert das Ab-

sinken das Vordringen der innertropischen Front des Westafrikanischen Sommermonsuns und das Aufquellen hochreichender Konvektion.

Anders über einer grünen, also dunkleren Sahara: Eine ausgedehnte Vegetationsdecke in der Sahara vermindert die Reflexion von Sonnenstrahlung, führt zu geringerem Absinken der Luft über der Sahara und erleichtert damit das Eindringen des Westafrikanischen Sommermonsuns in dieses Gebiet. Zudem speichern Pflanzen das Regenwasser, so dass auch über die lokale Verdunstung und Transpiration der Niederschlag über der Sahara zunimmt. Die Vegetation kann überleben und sich ausbreiten.

KANN VEGETATION „KIPPEN“?

Die Sahara ist noch für andere Überraschungen gut. In einigen Klimamodellen, in denen Vegetationsdynamik und die Dynamik der Atmosphäre miteinander gekoppelt sind, entwickeln sich für denselben Klimazustand unterschiedliche Vegetationszonen, je nachdem, wie das Klimamodell gestartet wird⁷. Wird am Beginn der Rechnung die heutige globale Vegetationsverteilung vorgeschrieben, so bleibt diese Verteilung mehr oder weniger erhalten - bis auf einige Regionen, in denen Modellfehler ein zu kaltes oder zu warmes, zu trockenes oder zu feuchtes Klima produzieren. Wird das Modell mit vollständig bewaldeten oder nur mit Gras bewachsenen Kontinenten gestartet, stellt sich nach einer gewissen Zeit die gleiche Vegetationsverteilung ein, allerdings mit einer Sahara, in der in weiten Teilen eine Savanne vorherrscht.

Was folgt daraus, dass unter heutigen Klimabedingungen sowohl eine „grüne Sahara“ als auch eine „trockene Sahara“ im Modell existieren kann? Aus der Physik und Mathematik ist bekannt, dass nichtlineare Systeme, wozu sicherlich auch das System Vegetation - Klima gehört, unter gleichen Bedingungen mehrere Zustände einnehmen und unter bestimmten Umständen von einem in einen anderen Zustand kippen können. Manche Ökosysteme zeigen in der Natur und im Labor solche Kippunkte oder Sprünge zwischen verschiedenen Zuständen⁸. Theoretisch betrachtet könnte also die Sahara, angetrieben durch die sich allmählich ändernde Erdbahn um die Sonne und die damit verbundene Änderung des Westafrikanischen Sommermonsuns, von einer „grünen“ in einen „trockenen“ Zustand gekippt sein. Was sagen die Daten aus der Klimageschichte?

Tatsächlich finden sich in einigen Klimaarchiven Afrikas Hinweise auf Kippunkte im Klima der Sahara der letzten Jahrtausende⁹. Der Staubtransport von der Sahara in den Atlantik, der sich aufgrund von Ablagerungen am Boden des Schelfmeeres vor der afrikanischen Küste rekonstruieren lässt, nahm vor gut 16000 Jahren abrupt ab und vor etwa 5500 Jahre wieder abrupt zu. Abrupt bedeutet hier: abrupt im Verhältnis zur sich allmählich, mit einer Periode von etwa 20000 Jahren ändernden geografischen Verteilung der Sonneneinstrahlung, wobei der Übergang selbst innerhalb einiger hundert Jahre von statten ging.

Eine Änderung des Staubeintrages deutet auf eine Änderung der Bodenbeschaffenheit hin, muss aber nicht mit einer starken Änderung der Vegetation einhergehen. Das einzige Klimaarchiv in der Sahara, anhand dessen sich die Dynamik der Vegetation der letzten mehreren tausend Jahre dokumentieren lässt, zeigt zwar starke Schwankungen und einen deutlichen Rückgang der Vegetation, aber kein Kippen des Ökosystems¹⁰. Das kann eine lokale Ausnahme sein. Eine theoretische Studie legt den Schluss nahe, dass eine große Pflanzenviel-

falt das Kippen von Ökosystemen verhindert. Demnach wäre ein Kippen in Regionen mit reicher Pflanzenvielfalt unwahrscheinlich, in anderen Regionen mit geringer Pflanzenvielfalt hingegen durchaus möglich¹¹.

Soweit zum Thema Sahara. Die Klimaforschung hat bisher nur wenige Anhaltspunkte für weitere Kippunkte im System Vegetation - Atmosphäre gefunden. Zu den möglichen Kandidaten zählt das tropische Südamerika, beim Übergang zwischen dem Regenwald des Amazonas und der trockeneren Savanne. Weitere Studien deuten daraufhin, dass nicht nur bei den räumlichen Vegetationsbedeckungen, sondern auch bei der Biomasse oder der Zusammensetzung der Vegetation abrupte Änderungen auftreten könnten.

VEGETATION UND MENSCH

„Ich hätte diese Betrachtungen ... mit einer Untersuchung der Veränderungen schließen können, welche der Mensch auf der Oberfläche des Festlandes durch das Fällen der Wälder, durch die Veränderung in der Vertheilung der Gewässer und durch die Entwicklung grosser Dampf- und Gasmassen an den Mittelpunkten der Industrie hervorbringt. Diese Veränderungen sind ohne Zweifel wichtiger, als man allgemein annimmt.“ schrieb Alexander von Humboldt 1843 in seinem Reisewerk zu seiner Expedition durch Zentral-Asien¹².

Für den welterfahrenen Beobachter waren die Änderungen der Landoberfläche in vielen Teilen der Erde Besorgnis erregend. Tatsächlich erreichte die Entwaldung Europas im 18ten Jahrhundert ihren Höhepunkt, so dass schon 1713 Hannß Carl von Carlowitz in seiner *Sylvicultura Oeconomica*¹³ forderte, den Raubbau der Wälder zu unterlassen und den „Anbau des Holtzes (so) anzustellen, daß es eine kontinuierliche, beständige und nachhaltige Nutzung gebe ...“. Welche Folgen hatte die nicht-nachhaltige Entwaldung und Umwandlung von Steppen in Ackerflächen und Weiden?

In der Literatur finden sich verschiedene Abschätzungen über die Entwicklung der Landnutzung. Aber sämtliche Abschätzungen zeichnen ein qualitativ ähnliches Bild. Heute nutzt der Mensch knapp 50 Millionen Quadratkilometer, also etwa ein Drittel der Landoberfläche, als Ackerfläche und Weide, während von den früher gut 50 Millionen Quadratkilometer Waldfläche nur noch knapp 35 Millionen Quadratkilometer übrig sind und von den ebenfalls rund 50 Millionen Quadratkilometern Steppe und Tundra weniger als 20 Millionen Quadratkilometer. Doch auch von der jetzigen Waldfläche sind nur etwa 10 Millionen Quadratkilometer, also weniger als ein Drittel, naturbelassen.

Die Abholzung der Wälder im Laufe der letzten gut 1000 Jahre hat den globalen Kohlenstoffkreislauf spätestens seit dem ausgehenden Mittelalter, also bereits deutlich vor der industriellen Revolution, statistisch signifikant geändert. Der Verlust von Kohlenstoff aus den Wäldern hat die Konzentration von CO₂ in der Atmosphäre um einige Volumenprozentpunkte ansteigen lassen. Diese Zunahme des Treibhausgases CO₂ hat zu einer Erwärmung des Klimas weltweit geführt (Abbildung 4). Die Änderung der bodennahen Energie- und Verdunstungsflüsse hat regional, z.B. über Nordamerika, Osteuropa, Ostasien, die bodennahe Temperatur zum Teil deutlich abgesenkt. Insgesamt dominiert jedoch der Effekt der Erhöhung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre, die im Wesentlichen mit der Abholzung in den Tropen einhergeht. Wahrscheinlich hat die Landnutzung die globale Mitteltemperatur um etwa 0.1 bis 0.2°C ansteigen lassen¹⁴. Diese Erwärmung beträgt knapp ein Fünftel der globalen

Erwärmung der letzten gut hundert Jahre, die in den letzten Dekaden im Wesentlichen der Emission von CO₂ durch Verbrennen von fossilen Kohlenstoff in Kohle, Öl und Gas zuzurechnen ist.

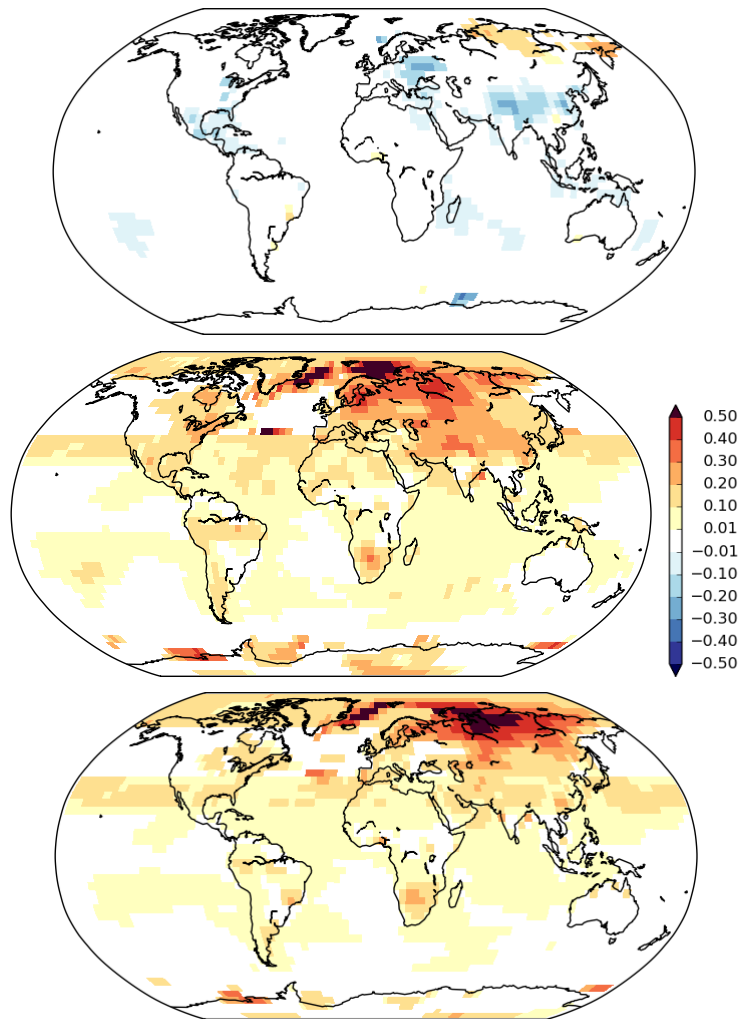


Abbildung 4: Berechnete Temperaturänderung, die nur durch die Landnutzung, also durch Entwaldung und Umwandlung von Steppe in Ackerflächen und Weideland im Laufe der letzten 1200 Jahre hervorgerufen wurden. Die obere Abbildung zeigt nur die Effekte der Änderung der bodennahen Energie- und Wasserflüsse durch Landnutzung, die mittlere nur die Effekte der Änderung der Kohlenstoffflüsse, und die untere die Summe beider Effekte. Diese Rechnungen wurden von Pongratz und anderen¹⁴ durchgeführt.

HEISSES KLIMA, GRÜNE WÜSTEN

Neben der direkten Änderung der Landoberfläche durch Abholzung und Beweidung hat der Mensch die Vegetation auch indirekt durch Emission von CO₂ beeinflusst. Bei steigender CO₂-Konzentration in der Atmosphäre können unter sonst gleichen Klimabedingungen Pflanzen das CO₂ effektiver aufnehmen als bei niedrigerer Konzentration. Insbesondere brauchen die Pflanzen ihre Blattöffnungen in CO₂-reicher Atmosphäre nicht so stark zu öffnen wie in CO₂-armer, um die gleiche Menge Kohlenstoff aufzunehmen. Damit verlieren

Pflanzen weniger Wasser durch Transpiration, das verfügbare Wasser wird effizienter genutzt. Dieser Effekt könnte in Zukunft bei weiterhin ungebremstem Anstieg der CO₂-Emissionen noch bedeutender werden.

Rechnungen mit einem Klimamodell zeigen als mögliche Antwort des globalen Klimas auf eine starke Emission von CO₂ einen Rückgang des Wüstenanteils¹⁵ (Abbildung 5) - vorausgesetzt, dass genügend Stickstoff und Phosphor als Dünger vorhanden sind. In den hohen nördlichen Breiten ist die Temperaturzunahme für den Rückgang der Polarwüste verantwortlich. In der Sahara hingegen ändert sich die jährliche Niederschlagsmenge nur geringfügig. In dieser Region wirkt vor allem der CO₂-Effekt. Wird die CO₂-Emission nach ein bis zwei Jahrhunderten wieder zurückgefahren, dann überwiegt das harschere Klima, und die Sahara dehnt sich wieder aus, wie weitere Klimarechnungen ergeben.

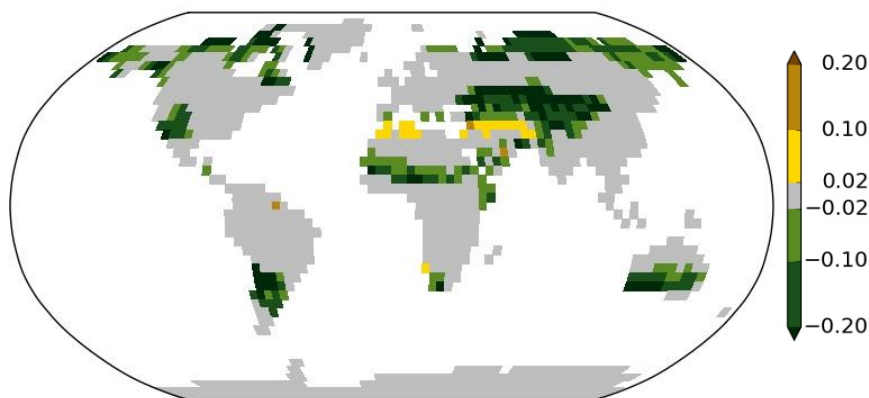


Abbildung 5: Mögliche Änderungen des Wüstenanteils (relative Änderung des Anteils in jedem Gitterelement) in den nächsten hundert Jahren in einem durch Emission von Treibhausgasen wärmer werdenden Klima. Diese Rechnungen wurden von Port und anderen¹⁵ durchgeführt.

FAZIT

Vor gut zwanzig Jahren wurden zum ersten Mal Modelle, welche die Dynamik der Atmosphäre, des Ozeans und der Vegetationszonen zu berechnen gestatten, miteinander gekoppelt. Die Entwicklung dieser komplexen Modelle ist noch längst nicht ausgereift. Nicht alle Facetten der komplexen Wechselwirkung zwischen Vegetation, Energie-, Wasser- und Kohlenstoffkreislauf sind verstanden. Dennoch haben sich einige allgemeine Aussagen als robust herauskristallisiert.

Sicherlich ist die Vegetation nicht nur ein Klimaindikator, sondern beeinflusst das Klima großer Regionen und Kontinente. Als Beispiel wurden hier die „grüne Sahara“ des mittleren Holozäns und das Wandern der nördlichen Baumgrenze im Wandel der Eis- und Warmzeiten angeführt. Über den bodennahen Energie- und Wasseraustausch wirken Veränderungen der Vegetationsbedeckung vor allem lokal und regional. Über den CO₂-Austausch können sie aber auch das globale Klima beeinflussen. Als Faustformel gilt: Tropische Wälder sorgen für Abkühlung, boreale Wälder für Erwärmung des Klimas.

Die Verlagerung der Taiga nach Süden und der starke Rückgang dieser Wälder beim Übergang in eine Eiszeit haben den Temperaturunterschied zwischen Eiszeit und Warmzeit wahrscheinlich verstärkt. Vermutlich hat die Dynamik der Vegetationszonen auch den Übergang von einer gänzlich eisfreien, grünen Welt in eine Welt mit Eiszeiten befördert. Dies gilt wahrscheinlich sowohl für den Übergang vom Karbon in die Eiszeit des Perms vor rund 320 Millionen Jahren, wie auch für die erste Vergletscherung der Antarktis vor etwa 35 Millionen Jahren und auch für den Beginn der Eisbildung auf Grönland und damit den Beginn der jetzigen geologischen Epoche, dem Quartär, vor rund 2,6 Millionen Jahren. Klimamodelle, in denen das Wandern der Vegetation nicht berücksichtigt wird, lassen keine Eiszeit entstehen oder berechnen nur einen verzögerten, reduzierten Aufbau von Eismassen. Bei der Diskussion langer Zeitabschnitte der Klimageschichte müssen die Wechselwirkung der Vegetation mit der Dynamik des Permafrostes und der Bildung von Torf in Feuchtgebieten, die Wechselwirkung der Vegetation mit der Gesteinsverwitterung und schließlich die evolutionäre Entwicklung der Pflanzenphysiologie berücksichtigt werden. Das sind spannende, erst in Ansätzen verstandene Herausforderungen der interdisziplinären Klimaforschung.

Auch das Kapitel der „Kippunkte im System Vegetation – Atmosphäre“ ist noch nicht abgeschlossen. Erkenntnisse auf diesem Gebiet sind für die Abschätzung möglicher zukünftiger Klima- und Vegetationsänderungen durchaus wichtig. Jede Gesellschaft muss sich auf Klimaänderungen einstellen. Die Möglichkeit dazu hängt nicht nur von der Gesellschaftsstruktur, sondern auch von der Stärke und dem Tempo der Klimaänderung ab. Vor einigen tausend Jahren führte die Austrocknung der Sahara zu einer Wanderung der Menschen aus deren damals grünen Gebieten in die klimatisch günstigeren Regionen nach Süden und an den Nil, wo sich rasch eine neue Hochkultur entwickelte¹⁶.

Die Landnutzung, also das Abholzen großer Waldflächen und die Umwandlung von Steppen und Wälder in Acker- und Weideland haben ihre deutlichen Spuren im regionalen Klima hinterlassen und, in geringerem Maße, auch im globalen Klima. In der jüngeren Vergangenheit hat die exponentiell ansteigende Emission von CO₂ durch Verbrennen von Kohle, Öl und Gas im globalen Maßstab die Effekte durch Landnutzung deutlich überflügelt. Somit erübrigt sich die Frage, ob eine drastische Änderung der Landnutzung, z.B. die großflächige Aufforstung aufgelassener Agrarflächen, ein geeignetes Mittel ist, der Emission von CO₂ aus fossilem Kohlenstoff entgegenzuwirken. Da der Mensch das Land ohnehin bewirtschaften muss, könnte er aber mit Blick auf eine nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen und unter Berücksichtigung des Erhalts der Vielfalt von Flora und Fauna Aufforstung für lokale Anpassungsmaßnahmen an Klimaänderungen nutzen.

Anmerkung:

Dieser Artikel wurde als Beitrag zum Buch „Zukunft des Klimas“ geschrieben. Das Buch wurde von Jochem Marotzke und Martin Stratmann herausgegeben und ist 2015 im C.H.Beck Verlag, München, erschienen.

Literatur:

- ¹ Köppen, W.: Das geographische System der Klimate. In: Köppen, W., Geiger, R.: Handbuch der Klimatologie. Band I, Teil C. Verlag Gebrüder Borntraeger, Berlin, 1936.
- ² von Humboldt, A.: Kosmos, Entwurf einer physischen Weltbeschreibung. Band I. J.G. Cotta, Stuttgart und Tübingen, 1845.
- ³ Claussen, M.: Klimaänderungen: Mögliche Ursachen in der Vergangenheit und Zukunft. UWSF - Z Umweltchem Ökotox. 15(1), 21-30, 2003.
- ⁴ Sellers, P.J., Dickinson, R.E., Randall, D.A., Betts, A.K., Hall, F.G., Berry, J.A., Collatz, G.J., Denning, A.S., Mooney, H.A., Nobre, C.A., Sato, N., Field, C.B., Henderson-Sellers, A.: Modelling the exchanges of energy, water, and carbon between continents and the atmosphere. *Science*, 275, 502-509, 1997.
- ⁵ Bathiany, S., Claussen, M., Brovkin, V., Raddatz, T., Gayler, V.: Combined biogeophysical and biogeochemical effects of large-scale land-cover change in the MPI Earth system model. *Biogeosciences*, 7, 1383–1399, 2010.
- ⁶ Ciais, P., Tagliabue, A., Cuntz, M., Bopp, L., Scholze, M., Hoffmann, G., Lourantou, A., Harrison, S.P., Prentice, I.C., Kelley, D.I., Koven, C., Piao, S.L.: Large inert carbon pool in the terrestrial biosphere during the Last Glacial Maximum, *Nature Geoscience*, 5, 74-79, 2012.
- ⁷ Claussen, M.: Late Quaternary vegetation – climate feedbacks. *Clim. Past*, 5, 203-216, 2009.
- ⁸ Scheffer, M., Carpenter, S. Foley, J.A., Folke, C., Walker, B.: Catastrophic shifts in ecosystems. *Nature*, 413, 591-596, 2001.
- ⁹ de Menocal, P.B., Ortiz, J., Guilderson, T., Adkins, J., Sarnthein, M., Baker, L., Yarusinski, M.: Abrupt onset and termination of the African Humid Period: Rapid climate response to gradual insolation forcing. *Quaternary Science Review*, 19, 347-361, 2000.
- ¹⁰ Kröplin, S., Verschuren, D., Lézine, A.-M., Eggermont, H., Cocquyt, C., Francus, P., Cazet, J.-P., Fagot, M., Russell, J.M., Darius, F., Conley, D.J., Schuster, M., von Suchodoletz, H., Engstrom, D.R.: Climate-driven ecosystem succession in the Sahara: The past 6000 years. *Science*, 30, 765-768, 2008.
- ¹¹ Claussen, M., Bathiany, S., Brovkin, V., Kleinen, T.: Simulated climate–vegetation interaction in semi-arid regions affected by plant diversity. *Nature Geoscience*, 6, 954-958, 2013.
- ¹² von Humboldt, A.: Zentral-Asien, Untersuchungen zu den Gebirgsketten und zur vergleichenden Klimatologie. Deutsche Übersetzung des Reisewerkes *Asie centrale* (1843) durch W. Mahlmann, 1844. Nachdruck: S. Fischer Verlag, Frankfurt a.M., 2009.
- ¹³ von Carlowitz, H.C.: *Sylvicultura Oeconomica* oder Haußwirthliche Nachricht und Naturmäßige Anweisung zur Wilden Baum-Zucht. Zweite Auflage 1732, Reprint, Verlag Kessel, Remagen-Oberwinter, 2009.
- ¹⁴ Pongratz, J., C. H. Reick, T. Raddatz, and M. Claussen: Biogeophysical versus biogeochemical climate response to historical anthropogenic land cover change, *Geophys. Res. Lett.*, 37, L08702, 2010.

¹⁵ Port, U., Brovkin, V., Claussen, M.: The influence of vegetation dynamics on anthropogenic climate change. *Earth Syst. Dynam.*, 3, 233–243, 2012.

¹⁶ Kuper, R., Kröpelin, S.: Climate-controlled Holocene occupation in the Sahara: Motor of Africa's evolution. *Science*, 313, 803-807, 2006.