

Rückkoppelungen zwischen Klima und Kohlenstoffkreislauf

Markus REICHSTEIN^{1*}

Was haben Diamant, Bleistiftminen, Kreide, Zucker, Erdöl, Kohlendioxid, Dimethylsulfid, Methan und die DNA, Träger der Erbinformation, gemeinsam? Sie enthalten alle zu einem wichtigen Anteil Kohlenstoffatome (C) und sie sind auf unserem Planeten zu finden. Allein diese Aufzählung zeigt in welch vielseitige Rollen Kohlenstoff schlüpfen kann. Betrachten wir das Klima und die Biosphäre im Erdsystem, so können wir mindestens drei Funktionstypen von Kohlenstoffverbindungen unterscheiden (*Abbildung 1*): Kohlenstoffverbindungen speichern freie chemische Energie, übermitteln biologische Information und besitzen wichtige physikalisch-chemische Eigenschaften. Letzteres ist von Bedeutung für unser Klima: die bekanntesten Kohlenstoffverbindungen sind dabei Kohlendioxid (CO₂) und Methan (CH₄), die als Treibhausgase die langwellige

Wärmestrahlung von der Erdoberfläche absorbieren und teilweise wieder zur Erde zurückschicken (Gegenstrahlung). Dieser natürliche Treibhauseffekt bewirkt eine Erhöhung der Durchschnittstemperatur auf der Erde auf einen Wert, der die aktuellen Lebensformen überhaupt möglich macht. Aber auch andere Kohlenstoffverbindungen, z.B. Dimethylsulfid ((CH₃)₂S), haben eine wichtige Wirkung, indem sie z.B. die Wolkenbildung beeinflussen.

Als Träger freier chemischer Energie ist Kohlenstoff das zentrale Element für alles Leben auf der Erde: Pflanzen nehmen bei der Photosynthese Kohlendioxid auf, verbinden es mit Wasser zu Zuckermolekülen und wandeln dabei Lichtenergie in chemische Energie um. Diese chemische Energie ermöglicht das Wachstum der Pflanzen und ist die Energie, die Mikroorganismen, Tieren und uns Menschen als

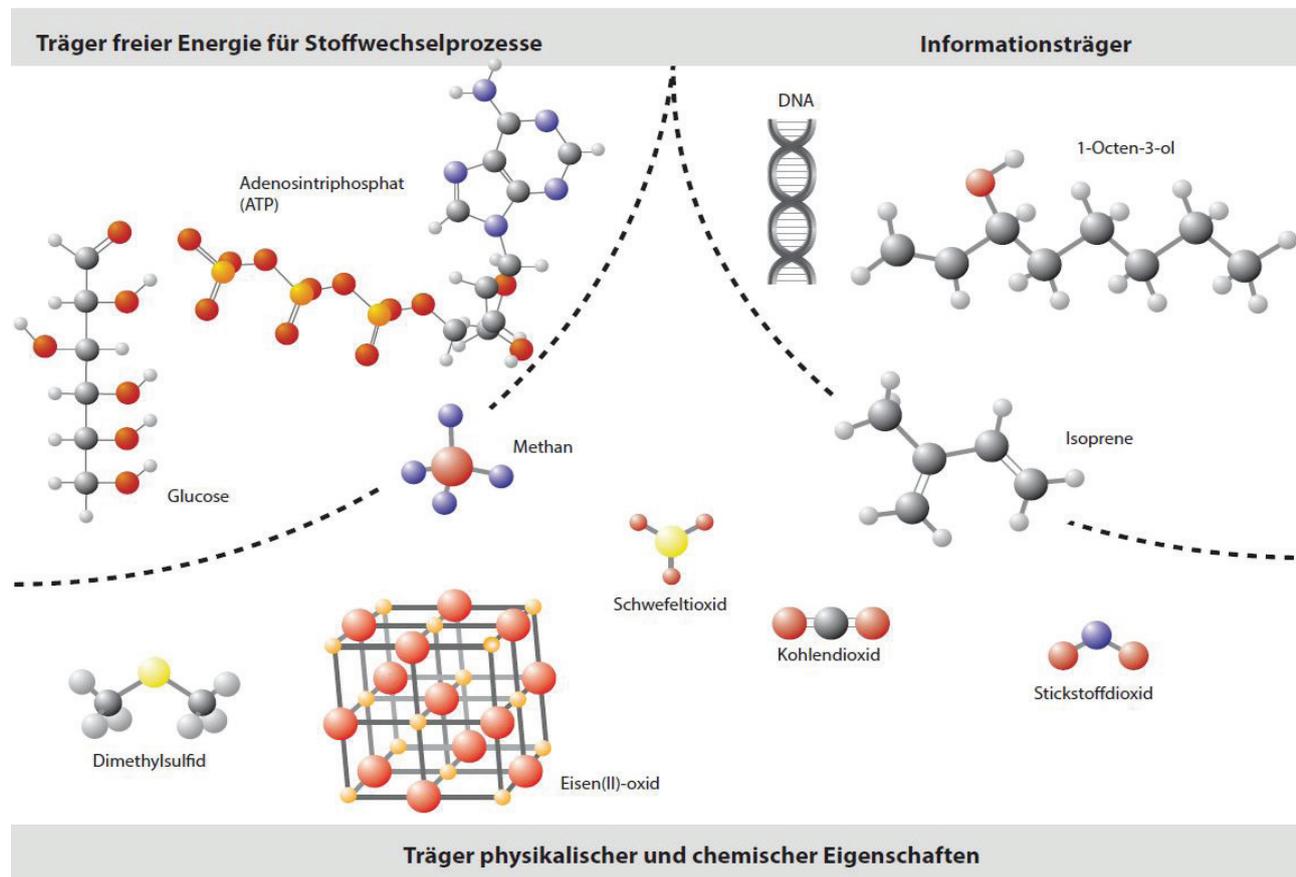


Abbildung 1: Kohlenstoffhaltige Moleküle mit unterschiedlichen Funktionen im Erdsystem

¹ Max-Planck Institut für Biogeochemie, Hans-Knöll-Straße 10, D-07745 JENA

* Direktor Dr. Markus REICHSTEIN, mreichstein@bgc-jena.mpg.de



Nahrung zur Verfügung steht. Bei der Atmung werden die Kohlenstoffmoleküle wieder in Kohlendioxid und Wasser umgewandelt, und die freiwerdende Energie kann vom Körper genutzt werden. Weil Kohlenstoffatome untereinander leicht Bindungen eingehen, können Lebewesen daraus auch kompliziertere Moleküle aufbauen, deren vorwiegender Zweck nicht Energiespeicher, sondern Information ist. Die DNA als Träger genetischer Information ist ein klassisches Beispiel. Weniger bekannt ist, dass Organismen auch über Kohlenstoffverbindungen kommunizieren: das Molekül 1-Octen-3-ol (*Abbildung 1*, rechts oben) verrät uns beispielsweise, dass Pilze im Wald sind. Diese Informationsfunktionen beeinflussen nun nicht das Klima in direkter Weise,

sie werden aber durch dieses beeinflusst. Es gibt außerdem eine Reihe von Kohlenstoffverbindungen, die in mehreren der drei Funktionstypen eine Rolle spielen. Beispielhaft ist in *Abbildung 1* Methan gezeigt, das sowohl ein wichtiges Treibhausgas ist, als auch Energiequelle für sogenannte methanotrophe Bakterien. Der Kohlenstoffkreislauf der Erde wirkt also auf das Klima und ist gleichzeitig notwendig für alles Leben auf der Erde und kann als Indikator der Lebensaktivität von Ökosystemen angesehen werden, welche wiederum vom Klima beeinflusst wird.

Wie sieht nun der globale Kohlenstoffkreislauf aus? Letztlich lässt er sich abstrakt durch den Austausch von Kohlenstoff zwischen verschiedenen Speichern oder Reservoiren

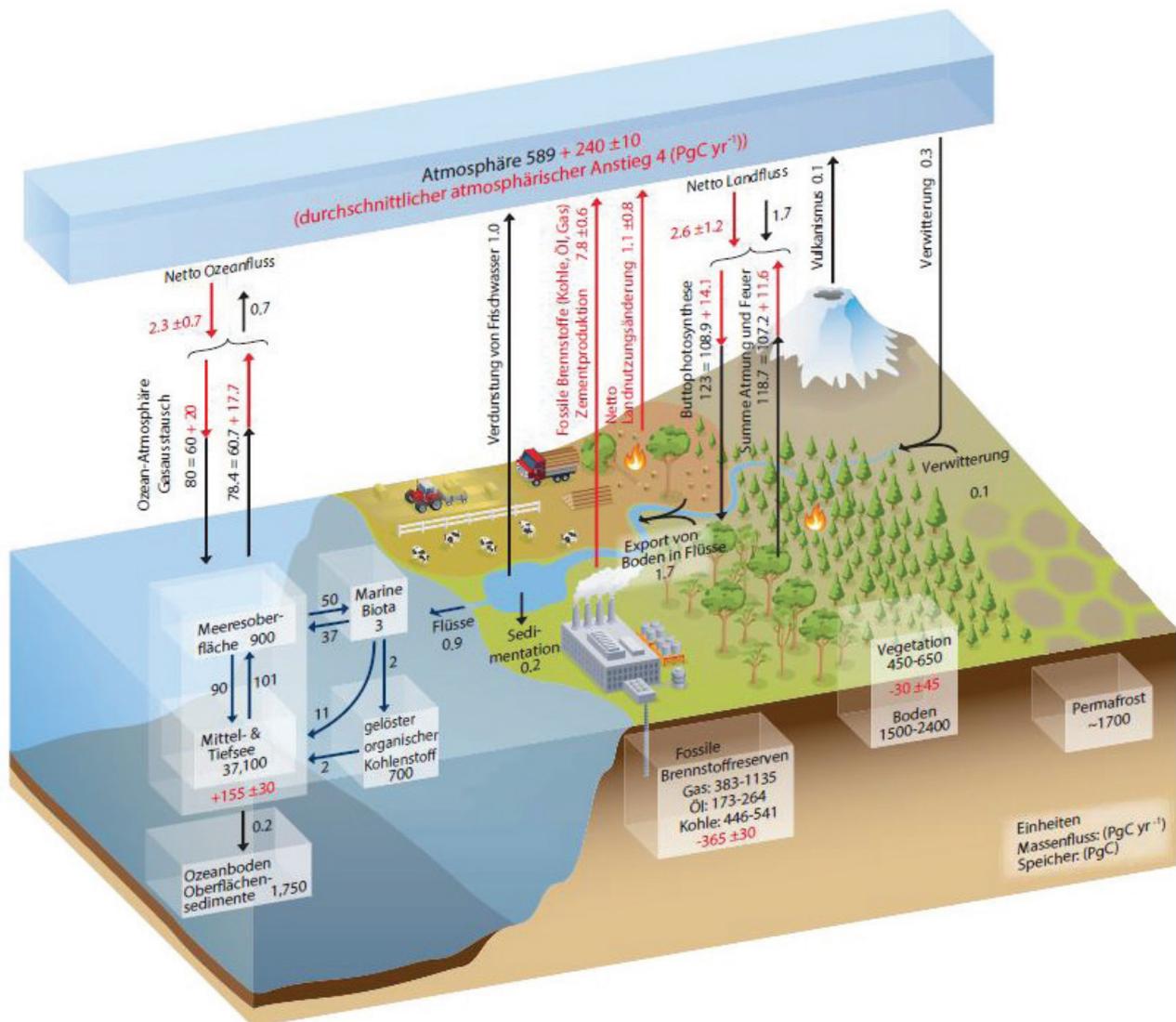


Abbildung 2: Übersetzt nach dem fünften Bericht des Weltklimarates [1]. Vereinfachtes Schema des globalen Kohlenstoffkreislaufs. Zahlen stellen Speichervorräte dar, auch „Kohlenstoffvorräte“ genannt in PgC (1 PgC = 10¹⁵ gC) und jährliche Kohlenstoffflüsse (in PgC yr⁻¹). Schwarze Zahlen und Pfeile geben Speichervorräte und Austauschraten geschätzt für die vor-industrielle Zeit, ungefähr 1750, an. Die Aufnahme von anthropogenem CO₂ durch den Ozean und terrestrische Ökosysteme, oft „Kohlenstoffsenken“ genannt, sind die roten Pfeile des Netto-Landflusses und des Netto-Ozeanflusses. Rote Zahlen in den Speichern kennzeichnen Gesamt-Veränderungen des anthropogenen Kohlenstoffs im Industriezeitalter von 1750-2011 (Spalte 2 in *Tabelle 6.1* ebenda). Vereinbarungsgemäß bedeutet eine positive Gesamt-Veränderung, dass ein Speicher seit 1750 Kohlenstoff hinzugewonnen hat. Die Gesamt-Veränderung des anthropogenen Kohlenstoffs im terrestrischen Speicher ist die Summe aus durch Landnutzungs-wandel kumulativ verlorenem Kohlenstoff und seit 1750 in anderen Ökosystemen akkumuliertem Kohlenstoff.

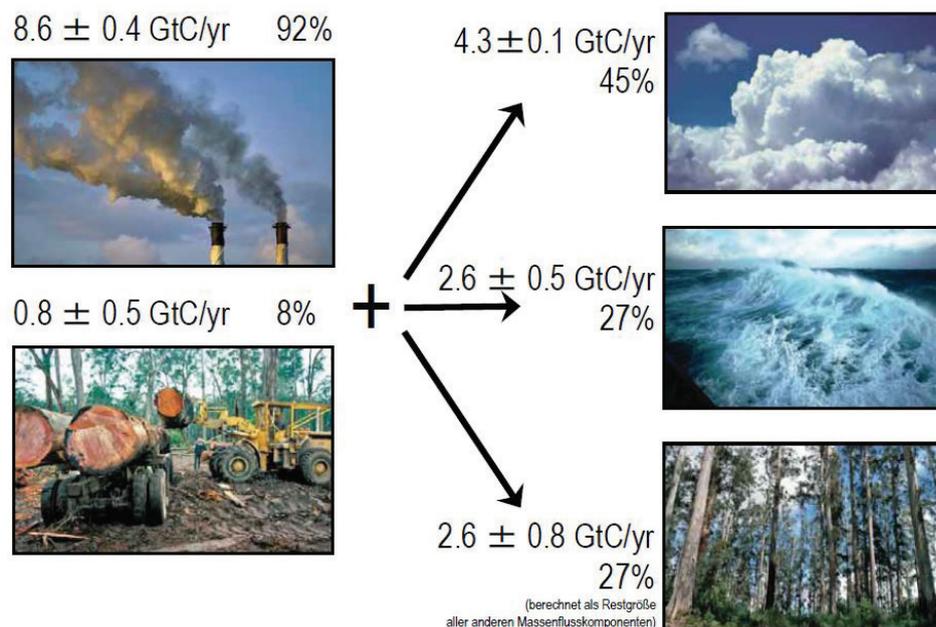


Abbildung 3: Anthropogene Kohlenstoffemissionen und deren Verbleib in der Atmosphäre, den Ozeanen und in Landökosystemen im Jahrzehnt 2003 bis 2012 (nach [8] und www.globalcarbonproject.org mit freundlicher Genehmigung von P. Canadell)

beschreiben. Größere Reservoirs sind zum Beispiel das Kohlendioxid in der Atmosphäre, die Kohlenstoffverbindungen im Holz der Bäume und im Boden, gelöstes Kohlendioxid im Meer und Karbonat haltiges Gestein (z.B. Kalkstein der Alpen) in der Erdkruste. Letzteres ist ein sehr großes, aber äußerst inaktives Reservoir, das heißt, es tauscht in für uns Menschen relevanten Zeiträumen keine bedeutenden Mengen an Kohlenstoff mit z.B. der Atmosphäre aus. Ganz anders verhält es sich mit dem Austausch zwischen der Atmosphäre und den Ökosystemen der Landoberfläche. Der größte Fluss - so nennt man den Massenstrom von einem Reservoir zum anderen - von Kohlenstoff auf der Erde findet durch die Photosynthese der Landvegetation statt: jedes Jahr werden dadurch ca. 120 Milliarden Gramm (1 Billiarde Gramm = 10¹⁵ Gramm = 1 Petagramm = 1 Gigatonne) Kohlenstoff aufgenommen und in Zuckermolekülen gespeichert. Bei einem Weltmarktpreis von einem halben Dollar pro Kilogramm Glukose (Traubenzucker) käme man in einer theoretischen Rechnung auf eine „Wertschöpfung“ von jährlich 160 Billionen Dollar, was größenordnungsmäßig dem zwei- bis dreifachen des Bruttoweltwirtschaftsprodukts entspricht (1). Dies sind enorme Mengen. Wenn man diese Menge auf den Quadratmeter Landoberfläche herunterbricht, liegt die durchschnittliche Glukoseproduktion jedoch nur bei etwa zwei Kilogramm pro Quadratmeter. Und davon verbrauchen die Pflanzen die Hälfte relativ schnell wieder für ihren eigenen Stoffwechsel. Für den globalen Kohlenstoffkreislauf ist eine andere Betrachtung noch interessanter: In der Atmosphäre befinden sich zurzeit ca. 830 Milliarden Gramm Kohlenstoff. Die Photosynthese entzieht ihr jedes Jahr etwa ein Siebtel des Kohlenstoffs oder statistisch gesehen wird ein Kohlendioxidmolekül der Atmosphäre im Durchschnitt alle 7 Jahre durch Photosynthese in ein Zuckermolekül eingebaut. Wenn es nur diesen Austauschprozess gäbe (und die Photosynthese

unabhängig vom Kohlendioxidgehalt gleich stark weitergehen könnte), wäre die Atmosphäre innerhalb von 7 Jahren kohlendioxidfrei. Das ist natürlich nicht der Fall, zeigt aber anschaulich, was für ein mächtiger Prozess die Photosynthese global gesehen ist. Warum geschieht das nicht? Weil sich der Kohlenstoffkreislauf annähernd in einem sogenannten Fließgleichgewicht befindet, das bedeutet, dass soviel wie in ein Reservoir hineinfließt auch in etwa wieder herausgeht (Abbildung 2). So werden die (genau) 123 Milliarden Gramm Kohlenstoff, die aufgenommen werden, durch Abgabe von knapp 119 Milliarden Gramm an die Atmosphäre (durch Atmung und Feuer) und Transport von 1.7 Milliarden Gramm in die Gewässer, nahezu wieder ausgeglichen [1]. Aber nur

nahezu, denn das Fließgleichgewicht ist nicht perfekt, und es verbleiben zurzeit jedes Jahr netto schätzungsweise 2.6 Milliarden Gramm in Pflanzen und Böden. Der wichtigste Grund für dieses nachweisbare Ungleichgewicht ist die vom Menschen verursachte Veränderung des Kohlenstoffkreislaufs (Abbildung 2, rote Zahlen). Durch Verbrennung fossiler Brennstoffe, Zementproduktion und Entwaldung gelangen jährlich knapp 9 Milliarden Gramm Kohlenstoff als Kohlendioxid in die Atmosphäre (2) und erhöhen dort den Kohlendioxidgehalt. Er ist seit der Industrialisierung um knapp 120 ppm (3) von ca. 280 ppm auf knapp 400 ppm gestiegen - so hoch wie seit etwa 10 Millionen Jahren nicht mehr. Dieser Anstieg ist allerdings geringer als zu erwarten wäre, wenn die Atmosphäre alle Emissionen aufnehmen und behalten würde, denn bei einer Gesamtemission seit der Industrialisierung von ca. 530 Milliarden Gramm würde man einen Anstieg von 250 ppm (und nicht 120 ppm) erwarten (4). Es verbleibt offensichtlich weniger als die Hälfte der Emissionen in der Atmosphäre. Wo der andere Teil der Kohlendioxidemissionen bleibt, und wie es in der Zukunft damit weitergeht, war und ist eine der wichtigen Rätsel in der Klima- und Erdsystemforschung.

Weil sich die Atmosphäre und der Ozean gut durchmischen und dadurch die räumliche Heterogenität geringer ist, sind Änderungen im Kohlenstoffgehalt dort recht genau bestimmbar. Aufgrund entsprechender Messungen und Beobachtungen kommt man für die letzten zehn Jahre zu folgendem Bild (Abbildung 3): Anthropogene Emissionen entstehen zu über 90% aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe und der Zementproduktion und zu 8% durch Entwaldung, vor allem in den Tropen. Der Anstieg der Kohlendioxidkonzentration in der Atmosphäre entspricht nur einem Anteil von 45% der Emissionen; 27% der Emissionen werden vom Ozean aufgenommen und weitere 27% von den Landökosystemen. Die Aufnahme von anthropogenem Koh-

lendioxid durch den Ozean oder terrestrische Ökosysteme wird auch „Kohlenstoffsene“ genannt. Ozean und Land puffern unsere Emissionen also in bedeutendem Umfang ab und schwächen dadurch gegenwärtig den Klimawandel ab. Die letzte Zahl, die sogenannte Kohlenstoffsene über Land, lässt sich allerdings nur indirekt als Restgröße bestimmen. Außerdem bleibt es eine große Herausforderung, direkt abzuschätzen, wo genau und durch welche Prozesse Landökosysteme mehr Kohlendioxid aufnehmen als sie abgeben. Hinzu kommt, dass die Aufnahme durch Landökosysteme alles andere als stabil ist: sie schwankt von Jahr zu Jahr zwischen 0 und 4 Milliarden Gramm, und in manchen Jahren ist sie sogar leicht negativ, es wird also mehr abgegeben als aufgenommen. Welche Faktoren diese Schwankungen beeinflussen, gibt auch Hinweise darauf, wie der Kohlenstoffkreislauf auf einen zukünftigen Klimawandel reagiert. Damit sind wir schon bei den drei großen Herausforderungen bezüglich des Kohlenstoffkreislaufs:

Diagnose, Verständnis und Vorhersage

Wie ein Arzt zum Beispiel eine Blutprobe entnimmt, um den Blutzuckerspiegel als einen Indikator des Stoffwechsels zu messen, ist zunächst einmal wichtig, den Kohlenstoffkreislauf auf der Erde genau zu beobachten. Durch Langzeitbeobachtungen der Kohlendioxidkonzentration in Hawaii (Mauna Loa) seit den 1960er Jahren wissen wir, wie sich der Kohlendioxidgehalt in der Atmosphäre von Monat zu Monat, Jahr zu Jahr und über Jahrzehnte verändert. Diese Messungen erlaubten frühzeitig einen aufsteigenden Trend des Kohlendioxidgehalts zu diagnostizieren, der sich wie oben beschrieben aus der Bilanz zwischen anthropogenen Emissionen in die Atmosphäre und der Aufnahme durch die Ozeane und Landökosysteme ergibt. Um herauszufinden, in welchen Regionen und Ökosystemen jene 2,6 Milliarden Gramm Kohlenstoff aufgenommen werden und wo sie gespeichert werden, bedarf es weiterer Messungen als nur die der Kohlendioxidkonzentration an einem Standort, so wie auch zur Diagnose von Diabetes und deren Ursachen auch weitere Parameter gemessen werden müssen. 2,6 Milliarden Gramm Kohlenstoff müsste man doch schnell finden können, mag man denken. Allerdings könnten sie theoretisch überall auf den 150 Millionen Quadratkilometern Landoberfläche aufgenommen werden. Rechnet man diese globale Aufnahme auf den Quadratmeter um, kommt man auf eine durchschnittliche Aufnahme von gut 17 Gramm pro Quadratmeter und Jahr. Mit anderen Worten, es gilt eine Änderung im Kohlenstoffgehalt - z.B. in einem Wald - zu detektieren, die weniger als der Hälfte eines normalen Blattes Papier entspricht (5). Bezogen auf den gesamten Kohlenstoffspeicher der Landökosysteme sind das weniger als 0,1%. Diese relative Änderung entspricht der Änderung des Füllstands einer Badewanne um weniger als 500 Micrometer. Dabei sind die Schätzungen für den Gesamtkohlenstoffspeicher schon bei weitem nicht so genau (vgl. Unsicherheitsspanne in *Abbildung 2*). Besonders unsicher und geradezu als „dunkle Materie“ der Erdsystemforschung zu bezeichnen ist der Bodenkohlenstoff: Während man noch vor etwa 20 Jahren davon ausging, dass im Boden etwa doppelt so viel Kohlenstoff wie in der Atmosphäre gespeichert ist (also ca. 1500 Milliarden Gramm), weiß man heute, dass es sich um

mindestens das Fünffache handelt. Ein großer Teil dieses Kohlenstoffs ist dabei im Permafrost „eingefroren“ und wird beim Auftauen durch die Klimaerwärmung teilweise freigesetzt werden (6).

Für Prognosen, wie sich der Kohlenstoffkreislauf in der Zukunft in einem sich verändernden Klima verhalten wird, reicht eine reine Quantifizierung der Speicher und deren Änderungen im *status quo* nicht aus: entscheidend ist es, die Zusammenhänge zwischen dem Kohlenstoffkreislauf und dem Klima zu erkennen und zu verstehen. Dazu ist es notwendig, nicht nur die Gesamtbilanz (die Nettokohlenstoffaufnahme) zu betrachten, sondern die einzelnen Prozesse und ihre Abhängigkeit von Klimavariablen zu analysieren. Dies ist vergleichbar dazu einen Staatshaushalt zu betrachten, der aus verschiedenen Einnahmen und Ausgaben besteht, die zum Verständnis im Einzelnen analysiert werden müssen. Der mit Abstand wichtigste Prozess zur Aufnahme von Kohlendioxid durch die Landökosysteme ist die pflanzliche Photosynthese. Die Kohlendioxidabgabe an die Atmosphäre geschieht durch die Atmung der Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen, sowie durch Feuer, z.B. Wald- und Steppenbrände.

Bezüglich der Reaktion der Nettobilanz auf Klimaänderungen hat sich vereinfacht folgende Betrachtungsweise etabliert: einerseits wird die Photosynthese durch erhöhte Kohlendioxidkonzentrationen („CO₂-Düngung“) gefördert und in kühleren Regionen durch steigende Temperaturen, wobei sich diese Effekte ab einem bestimmten Konzentrations- bzw. Temperaturniveau abschwächen (saturieren). Andererseits hängen Atmungsprozesse exponentiell von der Temperatur ab, aber nicht von der Kohlendioxidkonzentration. Daraus folgt, dass Landökosysteme als Reaktion auf steigende Temperaturen und Kohlendioxidkonzentrationen solange mehr Kohlenstoff aufnehmen, bis aufgrund des Temperaturanstiegs die Atmungsprozesse dominieren und netto Kohlendioxid an die Atmosphäre abgegeben wird. Diesem Prinzip folgen auch die meisten Klimamodelle, die den Kohlenstoffkreislauf beschreiben. Sie erklären die gegenwärtige Aufnahme der obengenannten 2,6 Milliarden Gramm Kohlenstoff mit den stimulierenden Effekten auf die Photosynthese, sagen aber voraus, dass sich diese Nettoaufnahme in der Zukunft deutlich abschwächt oder sogar in eine Nettoabgabe umkehrt. Das heißt die oben beschriebene derzeit zu beobachtende sogenannte negative Rückkopplung (mehr Kohlendioxid in der Atmosphäre führt zu Entzug von Kohlendioxid und somit zu einer Abschwächung des Anstiegs) kann sich in der Zukunft zu einer positiven Rückkopplung und damit einer selbstverstärkenden Klimaerwärmung umwandeln. Hinter diesem Modellansatz liegt die vereinfachende Vorstellung, dass die oberirdischen Photosyntheseprozesse und die unterirdischen Atmungsprozesse durch Mikroorganismen, Pflanzenwurzeln und Tiere konzeptionell getrennt betrachtet werden können. Die Forschung der letzten Jahre hat allerdings gezeigt, dass die Prozesse stark miteinander vernetzt sind, so dass ein komplexes dynamisches System mit vielfältigen Wechselwirkungen entsteht. Die Situation ist also komplizierter als oben beschrieben und Umweltänderungen können zu unerwarteten Abläufen im Ökosystem - insbesondere im Boden - führen, wenn physikalische, chemische und biologische Prozesse wechselwirken.

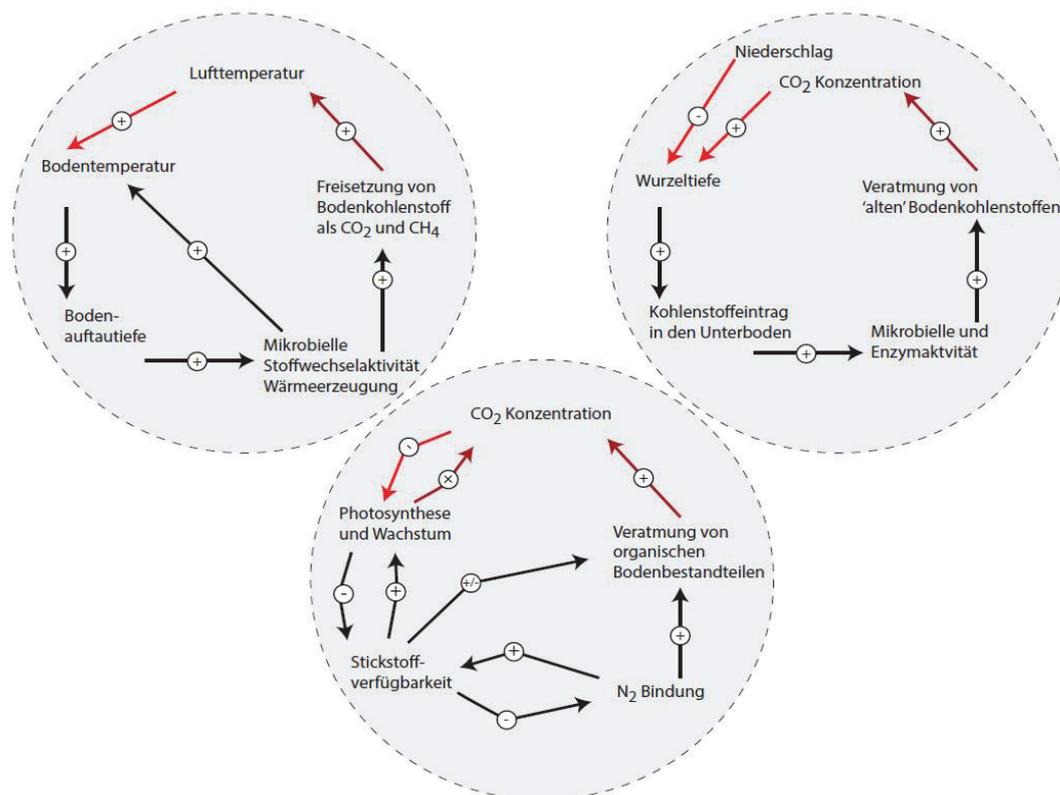


Abbildung 4: Ökosystemare Rückkopplungen die durch Klimaänderungen ausgelöst werden können mit Schwerpunkt auf Bodenprozessen. Drei Beispiele für kritische Prozessketten sind vereinfacht dargestellt, nach [4].

Bei der Betrachtung der Zukunft des Kohlenstoffkreislaufs und der Wechselwirkung mit Klima und anderen Umweltveränderungen müssen wir vor allem viele andere Faktoren als nur die Temperatur („global warming“) berücksichtigen.

In mehr als der Hälfte der Ökosysteme der Erde sind das Pflanzenwachstum und die Photosyntheseleistung stark durch die Wasserverfügbarkeit bestimmt [2]. Daher werden insbesondere Änderungen der Niederschlagsmenge und -verteilung direkten Einfluss auf Ökosysteme und deren Kohlenstoffkreislauf haben. Außerdem ist zu erwarten, dass mit dem anthropogenen Treibhauseffekt aufgrund der steigenden Globaltemperaturen die Verdunstung von Wasser zunimmt, was tendenziell zu mehr Trockenheit führt. Auf der anderen Seite führen steigende Kohlendioxidkonzentrationen zur Verengung der Spaltöffnungen in den Blättern der Pflanzen, die wie Ventile die Wasserabgabe regulieren, was zu einer verringerten Verdunstung führt.

Der Effekt einer veränderten Wasserverfügbarkeit auf die Nettokohlenstoffaufnahme (Photosynthese minus Pflanzen- und Bodenatmung) hängt stark von Bodeneigenschaften, wie der Wasserhaltekapazität, der Verteilung von Wurzeln und Kohlenstoff im Boden und der Trockenstresstoleranz der Vegetation ab. Wenn zum Beispiel der meiste Bodenkohlenstoff in den obersten Zentimetern konzentriert ist, die Wurzeln aber tief gehen und eventuell Grundwasser anzapfen können, wird die Bodenatmung stärker betroffen sein als die Photosynthese, weil der Oberboden zuerst austrocknet, während die Pflanzen weiter wachsen. Im Gegensatz dazu wird

die Photosynthese in flachgründigen Böden mit geringer Wasserhaltekapazität viel stärker betroffen sein. Unter Trockenheit kann es also je nach Standorteigenschaften theoretisch zu mehr Kohlenstoffaufnahme oder zu mehr Kohlenstoffverlusten kommen.

Daher sind Beobachtungen unter vielfältigen Bedingungen nötig - diese zeigen in der Tat, dass es in den allermeisten Fällen zu verringerter Kohlenstoffaufnahme kommt, wenn es trockener wird. Ein weiterer wichtiger Faktor ist die Stickstoffverfügbarkeit, die die Größe des oben genannten CO₂-Düngeeffekts stark beeinflussen oder sogar ganz verhindern kann [3]. Erst seit kurzem wird dieser Faktor in einigen globalen Kohlenstoffmodellen berücksichtigt und führt in diesen Modellen zu einem verringerten CO₂-Düngeeffekt von global mindestens 50 Milliarden Gramm. Als eine weitere wichtige Einflussgröße sei hier außerdem die solare Einstrahlung genannt, die als primäre Energiequelle direkt auf die Photosyntheseleistung wirkt und sich zum Beispiel durch Wolkenbildung verändert.

Neben diesem direkt einleuchtenden Effekt gibt es noch einen weiteren nicht so offensichtlichen Einfluss: Die auf der Erdoberfläche verfügbare Sonnenenergie besteht aus direkter Strahlung und diffuser Strahlung, d.h. indirektes Licht, das durch gestreute Reflexion des Sonnenlichtes in der Erdatmosphäre entsteht. Bei Zunahme der diffusen Strahlung im Verhältnis zur direkten Strahlung nimmt auf Ökosystemebene die Photosynthese zu, weil diffuse Strahlung tiefer in einen Vegetationsbestand eindringt. Also hat auch die Veränderung des Aerosolgehalts in der Luft einen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf, weil er

den Anteil diffuser Strahlung erhöht. Angesichts dieser komplexen Zusammenhänge ist es immer noch schwierig genaue Vorhersagen zum Kohlenstoffkreislauf zu machen.

Extremereignisse

Und es gibt einen weiteren wesentlichen Aspekt: Ökosysteme reagieren natürlich nicht auf das durchschnittliche Wetter oder (Mittelwert-)Klima - welches nur eine statistische Zusammenfassung über einen langen Zeitraum ist, sondern auf die konkrete Abfolge von Wetterereignissen. Nehmen wir ein einfaches Beispiel: eine konstante Lufttemperatur von 25°C bietet für einen typischen Wald oder ein Weizenfeld sehr gute Bedingungen für Photosynthese und Wachstum. Gibt es eine Periode, in der die Temperatur für beispielsweise 10 Tage auf 40°C ansteigt und danach für 10 Tage auf 10°C fällt, beträgt die Durchschnittstemperatur auch 25°C, aber der Hitzestress kann zu irreversiblen Schäden bei den Pflanzen geführt haben. Im Jahre 2003 hat die Hitzewelle verbunden mit Trockenheit in Europa den Klimaforschern gezeigt, dass einzelne Wetterereignisse einen großen Einfluss auf den Kohlenstoffkreislauf haben können. Während dieser Hitzeperiode ist in Mittel- und Westeuropa die Kohlenstoffaufnahme mehrerer Jahre rückgängig gemacht worden. Langfristige und deutlich über die Andauer des (extremen) Wetterereignisses hinaus anhaltende Auswirkungen entstehen vor allem dann, wenn langlebige Pflanzen wie Bäume so massiv geschädigt werden, dass sie absterben (und der in ihnen gespeicherte Kohlenstoff durch Pilze und Mikroorganismen veratmet und an die Atmosphäre abgegeben wird). Inzwischen sind derartige Beispiele rund um die Welt bekannt, z.B. neben Europa auch aus dem Amazonas-Regenwald oder dem Südwesten der USA. Globale Hochrechnungen mithilfe von Satellitendaten haben kürzlich ergeben, dass aufgrund extremer Wetterereignisse global jedes Jahr mehr als 2 Billionen Gramm Kohlenstoff nicht durch Photosynthese fixiert werden können [4]. Sollten sich solche Extremereignisse verdoppeln, könnte das die aktuelle Kohlenstoffsänke (2,6 Billionen Gramm) rechnerisch fast „auffressen“ (7). Solche negativen Extremereignisse des Kohlenstoffkreislaufs konnten dabei mit verschiedenen Faktoren in Verbindung gebracht werden: Trockenheit, Hitzewellen, Kälteeinbrüche, Feuerereignisse und Starkniederschläge. Auch hier spielt der Wasserkreislauf (Trockenheit) auf allen Kontinenten die wichtigste Rolle. Trockenheit ist auch einer der wenigen auf alle Ökosystemtypen wirkenden Faktoren. Stürme dagegen haben beispielsweise kaum Einfluss auf intakte Grasländer, während sie durch Windbruch und Entwurzelung von Bäumen auf Wälder verheerend wirken können (auch wenn in genutzten Wäldern versucht wird, dieses Holz noch zu ernten). Sturm „Lothar“ verursachte Waldschäden welche 16 Billionen Gramm Kohlenstoff potenziell der Zersetzung durch Mikroorganismen freigaben. Insgesamt kann die Wirkungskette Klimaänderungen, daraus folgende Verstärkung von Extremereignissen, daraus folgende Abgabe von Kohlenstoff an die Atmosphäre zu einem „Teufelskreislauf“, d.h. einer positiven Klimarückkopplung führen.

Es sind aber nicht nur die Extremereignisse die den Unterschied zu langsamen Änderungen etwa der mittleren Temperatur machen. Neben Extremereignissen sind auch

der Zeitpunkt an dem ein bestimmtes Wetterphänomen auftritt (z.B. Frost) oder die Verteilung einer Kenngröße (z.B. des Niederschlages) innerhalb des Jahresganges von wesentlicher Bedeutung für die Ökosysteme und den Kohlenstoffkreislauf. Ein früheres Austreiben der Vegetation führt beispielsweise dazu, dass dem Boden länger Wasser entzogen wird, so dass es im Sommer zu Trockenstress kommen kann. Insbesondere ist auch der Zeitpunkt der Niederschläge wichtig. Ein einfaches Beispiel: in Berlin fallen im Durchschnitt jährlich ca. 590 mm Niederschlag, in Lissabon 650-700 mm, also deutlich mehr. Trotzdem muss die Vegetation in Lissabon besser an Trockenheit angepasst sein. Warum? Unter anderem weil der Niederschlag dort vor allem im Winter fällt und in der Zeit, in der Einstrahlung und Temperaturen und damit der Wasserbedarf für die Pflanzen hoch sind, der Boden schon sehr ausgetrocknet ist (8). Im Gegensatz dazu fällt der meiste Niederschlag in Berlin im August, einem der wärmsten Monate. Auch der Einfluss z.B. von Hitzewellen auf ackerbauliche Kulturen ist völlig unterschiedlich zu bewerten, je nachdem, ob sie vor oder nach der Fruchtreife auftreten. Das heißt, wenn wir den Einfluss von Klimaänderungen auf Ökosysteme und deren Kohlenstoffkreislauf bestimmen wollen, müssen wir unbedingt auf den Jahresgang der verschiedenen Einflussgrößen achten.

Außerdem müssen wir uns auf unerwartete Rückkopplungen auch innerhalb der Ökosysteme einstellen, was Vorhersagen des Kohlenstoffkreislaufs noch komplizierter macht [5]. Ein Rückkopplungsmechanismus kann zum stark beschleunigten, sich selbst verstärkenden Auftauen von Permafrostböden führen (*Abbildung 4*, links oben). Hier besteht die interne Rückkopplung darin, dass Mikroorganismen durch Temperaturerhöhung aufgrund des Klimawandels aktiver werden, und ähnlich wie im Misthaufen durch ihre höhere metabolische Aktivität mehr Wärme abgeben, somit zur weiteren Bodenerwärmung beitragen und damit wiederum ihre eigene Aktivität befeuern. Ob der Effekt zum Tragen kommt, hängt unter anderem davon ab, wie gut Moose den Boden isolieren. Ist die Isolation stark, wird die Wärme nicht gut nach oben abgeführt und der selbstverstärkende Effekt kann eintreten. Die Schneebedeckung spielt hierbei auch eine überraschende Rolle: Stärkere Schneebedeckung führt eher zu einer Erwärmung und zum schnelleren Auftauen des Bodens, weil die Winterkälte durch die Schneeisolierung nicht so schnell in den Boden eindringen kann. Eine weitere rückkoppelnde Kausalkette ist oben rechts in *Abbildung 4* zu finden. Veränderte Kohlenstoffkonzentrationen und veränderter Niederschlag können zu stärkerer und tieferer Durchwurzelung und damit zu mehr frischem Kohlenstoff im Boden führen. Auch dies regt die mikrobielle Aktivität an, so dass mehr Kohlenstoff zu CO₂ veratmet wird, vor allem auch alter Kohlenstoff, der sonst nicht abgebaut würde. Zusätzlich birgt die Wechselwirkung mit dem Stickstoffkreislauf weitere komplexe Rückkopplungen (*Abbildung 4* unten). All diese Rückkopplungen sind noch nicht gut verstanden und Gegenstand aktiver Forschung.

Kohlenstoff-Engineering

Wir haben es also beim Kohlenstoffkreislauf mit einem hochkomplexen System zu tun, das sich durch nicht-lineares Verhalten auszeichnet, bei dem kleine Anstöße große

Wirkungen haben können und umgekehrt große Anstöße durchaus abgepuffert werden können. Vorhersagen sind also schwierig, denn oftmals spielen nicht bedachte indirekte Effekte eine wichtige Rolle. „Rettungsmaßnahmen“ wie Geoengineering sind deshalb auch sehr viel schwieriger und riskanter als einige einfach wirkende Lösungen uns manchmal fälschlich glauben lassen. Eine Idee ist zum Beispiel, Kohlendioxid aus der Atmosphäre durch Aufforstung von bisher nicht bewaldeten Flächen, inklusive der Wüsten zu entfernen. Das Potenzial solcher Maßnahmen ist eher gering und die potenziellen Nebenwirkungen sind vielfältig. Nach jüngsten Modellrechnungen [6] können der Atmosphäre auf diese Weise bis zum Jahr 2100 etwa 100 Milliarden Gramm Kohlenstoff entzogen werden, gerade mal 5% unserer erwarteten Kohlendioxid-Emissionen bis zu diesem Zeitpunkt (9). Gleichzeitig verringert sich die Rückstrahlung (Albedo genannt), d.h. die Erde wird dunkler, weil die Wälder viel Strahlung absorbieren, was insgesamt zu einer höheren Temperatur führt. Außerdem verändern sich zumindest regional die Niederschlagsverteilungen, was zu einem verändertem Abfluss in die Ozeane und damit verändertem Salzgehalt der Küstengewässer führt. Eine großflächige Bewaldung würde außerdem zu weniger Staubverblasung führen. Da dieser Staub Mikronährstoffe enthält, würde die damit verbundene Düngewirkung, z.B. im Ozean oder im Amazonasregenwald abnehmen.

Ein weiteres Beispiel, an dem man bereits jetzt die Folgen eines zu kurz gedachten Engineering beobachten kann, ist die Bioenergie. Sie soll fossile, nicht-nachwachsende Brennstoffe durch nachwachsende Rohstoffe ersetzen (z.B. Biodiesel) und dadurch Kohlendioxidemissionen einsparen. An sich eine gute Idee, aber wenn man, wie Anfang der 2000er Jahre in Europa einseitige Anreize schafft, entstehen problematische Nebenwirkungen wie Entwaldung zur Schaffung von Anbauflächen für Bioenergiepflanzen und klimawirksame Spurengasemissionen, die den eigentlichen Effekt zunichtemachen, ein Verlust an biologischer Vielfalt,

mannigfaltige sozio-ökonomische Folgen, die mit der starken Konkurrenz zu und Verdrängung von Nahrungsmittelproduktion und Zerstörung von kleinbäuerlichen Strukturen einhergehen [7]. Hier kommt man schnell zu Themen, die die eigentliche Klimaforschung überschreiten. Dies ist auch nicht verwunderlich angesichts der Vielfältigkeit des Kohlenstoffs.

Literatur

- [1] Stocker, T.F., Q. Dahe, G.-K. Plattner, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers (IPCC, 2013), (2013).
- [2] Beer, C., M. Reichstein, E. Tomelleri, P. Ciais, M. Jung, N. Carvalhais, C. Rödenbeck, M. A. Arain, D. Baldocchi, G.B. Bonan, A. Bondeau, A. Cescatti, G. Lasslop, A. Lindroth, M. Lomas, S. Luysaert, H. Margolis, K.W. Oleson, O. Rouspard, E. Veenendaal, N. Viovy, C. Williams, F.I. Woodward, D. Papale, Terrestrial gross carbon dioxide uptake: global distribution and covariation with climate. *Science* **329**, 834-838 (2010).
- [3] Zaehle, S., Terrestrial nitrogen-carbon cycle interactions at the global scale. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* **368**, 20130125 (2013).
- [4] Reichstein, M., M. Bahn, P. Ciais, D. Frank, M.D. Mahecha, S.I. Seneviratne, J. Zscheischler, C. Beer, N. Buchmann, D.C. Frank, Climate extremes and the carbon cycle. *Nature* **500**, 287-295 (2013).
- [5] Heimann, M., M. Reichstein, Terrestrial ecosystem carbon dynamics and climate feedbacks. *Nature* **451**, 289-292 (2008); published online Epub 17 Jan.
- [6] Keller, D.P., E.Y. Feng, A. Oschlies, Potential climate engineering effectiveness and side effects during a high carbon dioxide-emission scenario. *Nat Commun* **5**, (2014); published online Epub02/25/online (10.1038/ncomms4304).
- [7] Schubert, R., Future bioenergy and sustainable land use (Earthscan, 2010).
- [8] Quéré, C.L., R.J. Andres, T. Boden, T. Conway, R. Houghton, J.I. House, G. Marland, G.P. Peters, G. van der Werf, A. Ahlström, The global carbon budget 1959-2011. *Earth System Science Data* **5**, 165-185 (2013).

- (1) 1g Kohlenstoff sind in 2,66 g Glucose ($C_6H_{12}O_6$) enthalten, also entsprechen 120 Pg Kohlenstoff 320 Pg Glucose, was 320 Billionen kg sind und damit theoretisch 160 Billionen Dollar wert sind.
- (2) Dies sind die sogenannten anthropogenen Kohlendioxid Emissionen gemessen als Kohlenstoffmasse. Da Kohlendioxid neben Kohlenstoff noch zwei Sauerstoffatome enthält, entspricht dies einer Kohlendioxid-Masse von ca. 33 Billionen Tonnen. In wirtschaftswissenschaftsnahen Betrachtungen wird häufig die Kohlendioxidmasse angegeben.
- (3) Die Einheit ppm gibt hier das Volumen-Mischungsverhältnis an -1 ppm bedeutet das ein Millionstel des Gesamtvolumens durch Kohlendioxid gefüllt ist.
- (4) 1ppm entspricht hochgerechnet 212 Milliarden Gramm Kohlenstoff als Kohlendioxid in der Atmosphäre.
- (5) Ein normales Blatt Papier wiegt 80 Gramm pro Quadratmeter, der Anteil von Kohlenstoff darin liegt bei etwa 45%, also sind 36 g Kohlenstoff pro Quadratmeter Papier enthalten.
- (6) Hier sei angemerkt, dass es noch sehr größere Kohlenstoffspeicher auf der Erde gibt, so zum Beispiel mehr als das Zehntausendfache in Karbonaten und anderen Sedimenten in der Erdkruste, aber dass diese nach menschlichen Zeithorizonten inaktiv sind und vor allem in erdgeschichtlichen Zusammenhängen (Millionen von Jahren) eine Rolle spielen.
- (7) Ganz so einfach ist die Rechnung in Bezug auf die Gesamtbilanz allerdings nicht, weil auch Atmungsprozesse betroffen sind, deren Reaktion bisher deutlich unklarer ist.
- (8) Ein weiterer wichtiger Grund ist außerdem die südliche Lage, die erhöhter Sonneneinstrahlung und damit zu erhöhter Verdunstung führt
- (9) Vgl. RCP8.5 Szenario im 5. IPCC Bericht [1].

**Dieser Beitrag wird in geänderter Form im Beck-Verlag „Zukunft Klima“
(Reichstein in Gruss & Marotzke 2015) erscheinen.**