

C02-Party: Spaß mit Wahrscheinlichkeiten

geschrieben von Chris Frey | 18. Dezember 2021

Clyde Spencer

PARTY TIME

Stellen Sie sich vor, jemand beschließt, eine Themen-Party zu veranstalten und wählt das Thema „Blau“. Sie laden 10 ihrer Freunde ein und bitten jeden von ihnen, eine Plastiktüte mit blauen M&Ms™-Bonbons mitzubringen. Wenn die Gäste eintreffen, leeren sie ihre Tütchen in eine leere Bowlenschüssel. Der Gastgeber stellt die gefüllte Schale auf den Vorspeisetisch. Wenn man davon ausgeht, dass jeder Gast im Durchschnitt etwa 100 Stück mitbringt, gibt es insgesamt etwa 1.000 Stück. Im Laufe des Abends bedienen sich die Gäste sparsam am Inhalt der Bowlenschüssel (der Gastgeber enthält sich). Am Ende des Abends sind noch einige Bonbons übrig. Beim Verlassen des Lokals erhebt einer der Gäste Anspruch darauf und behauptet dreist, es seien etwa halb so viele Bonbons wie er mitgebracht habe, und es müssten daher dieselben sein, die er mitgebracht habe, obwohl er deutlich weniger Bonbons mitgebracht habe als die anderen! Abgesehen davon, dass diese Behauptung ein wenig ungehobelt ist, was können wir daraus schließen?

Streng genommen haben wir es mit einer Stichprobe ohne Ersatz zu tun, was bedeutet, dass die Wahrscheinlichkeit, ein Bonbon zu ziehen, das von einer beliebigen Person gespendet wurde, im Laufe der Zeit variiert, je nachdem, wie viel von dem Beitrag einer bestimmten Person nach den Entnahmen übrig bleibt. Leider haben wir diese Information nicht. Zur Veranschaulichung nehme ich an, dass von allen Gästen ungefähr gleich viele Bonbons gezogen werden und dass die Gesamtzahl der Bonbons so groß ist, dass sich das Verhältnis zwischen den gezogenen und den verbleibenden Bonbons zumindest anfangs nur geringfügig ändert. Daher bleibt die Wahrscheinlichkeit annähernd konstant, bis wir unter 10 Stück kommen. Daher die folgende Abhängigkeit von der Anfangswahrscheinlichkeit. Wie in der Klimatologie üblich, werde ich Wahrscheinlichkeitsunsicherheiten und deren Ausbreitung ignorieren. Ich werde nur mit Größenordnungen arbeiten.

Wenn nur ein Bonbon übrig wäre, könnte man mit 100-prozentiger Wahrscheinlichkeit davon ausgehen, dass eine Person es mitgebracht hat. Aber wer? Wahrscheinlich die erste Person, die ankam und ihr Bonbon in die Schale legte, wenn der Inhalt nicht vermischt worden war. FILO – First In, Last Out! Oder, noch wahrscheinlicher, die Person, die die meisten Süßigkeiten mitgebracht hat, wenn der Inhalt gut gemischt ist. In Ermangelung von Informationen über die Menge und die Reihenfolge der in die Schale gelegten Bonbons können wir wahrscheinlich nur sagen, dass

das einzige übrig gebliebene Bonbon mit einer Wahrscheinlichkeit von 1:10, also 0,1, einer bestimmten Person gehört, wenn wir davon ausgehen, dass jeder ungefähr die gleiche Anzahl von Bonbons mitgebracht hat. Das erlaubt uns allerdings nicht zu bestimmen, wer diese Person ist.

Etwas interessanter und komplizierter wird es, wenn zwei Bonbons übrig sind. Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass die gleiche Person beide Stücke mitgebracht hat? Die Wahrscheinlichkeit einer Folge von Ereignissen ist das Produkt der Wahrscheinlichkeiten der einzelnen Ereignisse. Diese Wahrscheinlichkeit beträgt etwa $0,1 \times 0,1$ oder 0,01 im gut gemischten Fall, von dem ich ausgehen werde. Was ist, wenn fünf Stücke übrig sind? Die Wahrscheinlichkeit, dass ein und dieselbe Person alle fünf übrig gebliebenen Stücke mitgebracht hat, beträgt etwa $0,1$ hoch 5, also $0,1^5 \approx 10^{-5}$. Es sollte offensichtlich sein, dass die Zuordnung der Quelle schnell unsicher wird, wenn die Anzahl der Quellen und die Anzahl der Ereignisse (Bonbonstücke) zunimmt! Daher ist es sehr unwahrscheinlich, dass ein und dieselbe Person alle verbleibenden Stücke mitgebracht hat. Das heißt, es ist sehr unwahrscheinlich, dass eine große Anzahl von Bonbons übrig bleibt, die alle von derselben Person stammen. Die Wahrscheinlichkeit steigt jedoch auf 1 an, wenn die Anzahl der Bonbons auf 1 sinkt.

ANALOGY TIME

In der obigen Geschichte stellt die Bowlenschüssel die troposphärische Atmosphäre dar, die beigetragene blauen M&Ms den jährlichen Fluss von gut gemischtem CO₂, das im Winter zugeführt wird, und die verzehrten Süßigkeiten den jährlichen Fluss von CO₂, das von den globalen Senken, hauptsächlich während des Sommers, aufgefangen wird. Die Anzahl der Bonbons, die am Ende der Party übrig bleiben, stellt den jährlichen Nettoanstieg an CO₂ dar. Da die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre jährlich um eine Menge ansteigt, die fast der Hälfte der geschätzten anthropogenen Emissionen entspricht, wird allgemein behauptet, dass der Mensch allein für den Anstieg des atmosphärischen CO₂ verantwortlich ist und dass die Beseitigung der anthropogenen Emissionen den Anstieg des CO₂ und damit den Temperaturanstieg auf der Erde stoppen wird.

Ein Problem bei der Annahme, dass nur die anthropogenen Emissionen für den jährlichen CO₂-Anstieg verantwortlich sind ist, dass es dafür keine empirischen Belege gibt. Der Rückgang der anthropogenen Emissionen während des Höhepunkts der COVID-Pandemie führte zu keinem messbaren Rückgang des Gesamtanstiegs im Jahr 2020 oder der Anstiegsrate für irgendeinen der Monate; auch erfolgte der Rückgang nicht schneller als üblich. Ich habe dies [hier](#) im Detail erörtert.

Aus dem oben verlinkten Artikel geht hervor, dass die atmosphärische CO₂-Konzentration saisonal schwankt. Sie steigt von Oktober bis Mai um etwa 8 PPMv und sinkt von Juni bis September um etwa 6 PPMv. Während der Hochlaufphase, vom Herbst bis zum frühen Frühjahr, ist die Photosynthese deutlich reduziert, und die Nettoveränderung ist ein Anstieg der

atmosphärischen CO₂-Konzentration. Im April 2020 kam es jedoch zu einem pandemiebedingten Rückgang der anthropogenen CO₂-Konzentration um etwa 18 %, wobei jedoch keine Veränderung der Anstiegsrate zu beobachten war; die Kurve sah im Wesentlichen wie im Vorjahr aus. In ähnlicher Weise war die maximale Konzentration, die im Mai erreicht wurde, praktisch dieselbe wie in den Jahren 2018-2019, obwohl die geschätzten anthropogenen CO₂-Emissionen von Dezember 2019 bis Mai 2020 reduziert wurden.

Die anthropogenen CO₂-Quellen, die nicht alle aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe stammen, machen nur etwa 4 % des gesamten CO₂-Flusses im Kohlenstoffkreislauf aus, was stark darauf hindeutet, dass der geringe Fluss an anthropogenem CO₂ durch die biogenen Quellen und die Ausgasung aus dem sich erwärmenden Wasser in den Schatten gestellt wird, was zu einer vernachlässigbaren restlichen anthropogenen Akkumulation in der Atmosphäre führt.

Das gesamte CO₂ wird auf die verschiedenen Senken (Luft, Wasser, Landpflanzen, Phytoplankton) verteilt, und zwar im Verhältnis zum Anteil an der jährlichen Gesamtsumme. Die Senken können nicht unterscheiden, ob das CO₂ aus fossilen Brennstoffen, aus der Pflanzenatmung oder aus der bakteriellen Zersetzung stammt! Das heißt, wenn alle Emissionen fossiler Brennstoffe morgen auf magische Weise aufhören würden, könnten wir nur mit einem Rückgang der Wachstumsrate der atmosphärischen CO₂-Konzentration um <4 % rechnen, nicht mit den 50 %, die man uns weismachen will.

Das Problem ist, dass Quellen und Senken empfindlicher auf die CO₂-Häufigkeit (Partialdruck) reagieren als auf andere Unterschiede wie das Atomgewicht der CO₂-Moleküle. Daher können die Quellen nicht signifikant zwischen anthropogenen und natürlichen Quellen, wie biogenem CO₂ oder Meeresausgasungen, unterscheiden. Das Gleiche gilt für Senken, mit der bemerkenswerten Ausnahme, dass photosynthetische Organismen eine leichte Präferenz für leichte CO₂-Moleküle mit einem ¹²C-Isotop zeigen. Das ist der Punkt der kleinen Geschichte über die M&Ms. Das heißt, wenn die Person, die die restlichen Süßigkeiten beansprucht, keine mitgebracht hätte, wären wahrscheinlich immer noch einige Süßigkeiten übrig, auch wenn es offensichtlich nicht seine gewesen sein können.

Eine andere Betrachtungsweise ist, dass bei einer Näherung erster Ordnung, bei der die Isotopenfraktionierung außer Acht gelassen wird, die Senken der Atmosphäre CO₂ in direktem Verhältnis zur relativen Häufigkeit der CO₂-Quellen entziehen sollten. Das heißt, wenn es einen jährlichen Nettozuwachs von 2 oder 3 PPM gibt, muss fast alles davon aus den Quellen mit dem größten Vorkommen stammen – ozeanische Ausgasung und biogene Atmung. Das gleiche Argument über den trivialen Beitrag vulkanischer Aktivitäten gilt auch für die anthropogenen Emissionen.

Die meisten der behaupteten Belege für die anthropogene CO₂-Konzentration in der Atmosphäre beruhen auf Veränderungen der isotopischen

Kohlenstoffanteile. Das Argument lautet, dass fossile Brennstoffe ein geringes Defizit an ^{13}C aufweisen und der gemessene Anstieg des relativen Anteils von ^{12}C in der Atmosphäre daher von CO_2 aus fossilen Brennstoffen herrühren muss. Die Situation ist komplexer als angenommen, denn neuere Arbeiten ([Kieft et al., 2021](#)) haben gezeigt, dass die bakterielle Wiederverwertung von gelösten organischen Stoffen in den Ozeanen das ^{13}C -Isotop anreichern kann!

Während der Nacht atmen die Pflanzen CO_2 aus. Schlafende Laubbäume atmen (im Winter) noch über ihre Wurzeln. Immergrüne Bäume in borealen Wäldern atmen jedoch mehr, weil sie ihre Nadeln behalten. Ich würde erwarten, dass diese Atmung, die zum CO_2 -Anstieg im Winter beiträgt, einen Mangel an ^{13}C aufweist.

Ein weiterer Fehler in der Isotopenverteidigung ist, dass es eine Präferenz für leichtes (^{12}C -reiches) CO_2 geben sollte, das von der Ozeanoberfläche ausgasst, weil der Wind weniger Energie benötigt, um es abzutransportieren, als für die schwereren Moleküle. Mir ist nicht bekannt, dass irgendjemand dies bei der Verteidigung der Behauptung, der Anstieg des atmosphärischen CO_2 sei das Ergebnis anthropogener Emissionen, in Betracht gezogen hat, obwohl einige frühe Arbeiten ([Doctor, et al., 2008](#)) mit Süßwasser durchgeführt wurden. Darüber hinaus zeigen [Mayorga et al. \(2012\)](#), dass eine Isotopenfraktionierung zwischen den gelösten Kohlenstoffspezies Kohlensäure, wässriges Bikarbonat und wässriges Karbonat bei der Umwandlung zwischen den Spezies, bei pH-Änderungen sowie bei Ausgasungen stattfindet. Frühere Arbeiten von [Wanninkhof \(1985\)](#) ließen einige Fragen unbeantwortet, stellten aber fest:

„Ein Box-Modell von Keeling et al. (1980) zeigt einen Unterschied in der $\delta^{13}\text{C}$ -Veränderung in der Atmosphäre von 1956 bis 1978 von 0,15 ‰, je nachdem, ob eine Luft-Wasser-Fraktionierungskonstante von -14 ‰ oder 0 ‰ verwendet wird. Dies ist ziemlich signifikant, wenn man bedenkt, dass die gesamte $\delta^{13}\text{C}$ -Veränderung in der Atmosphäre in den letzten 100 Jahren etwa -1 ‰ beträgt, basierend auf Baumringdaten (Peng et al., 1983).“

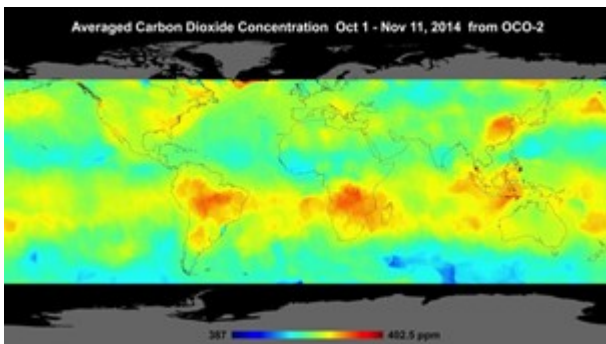
EVIDENCE TIME

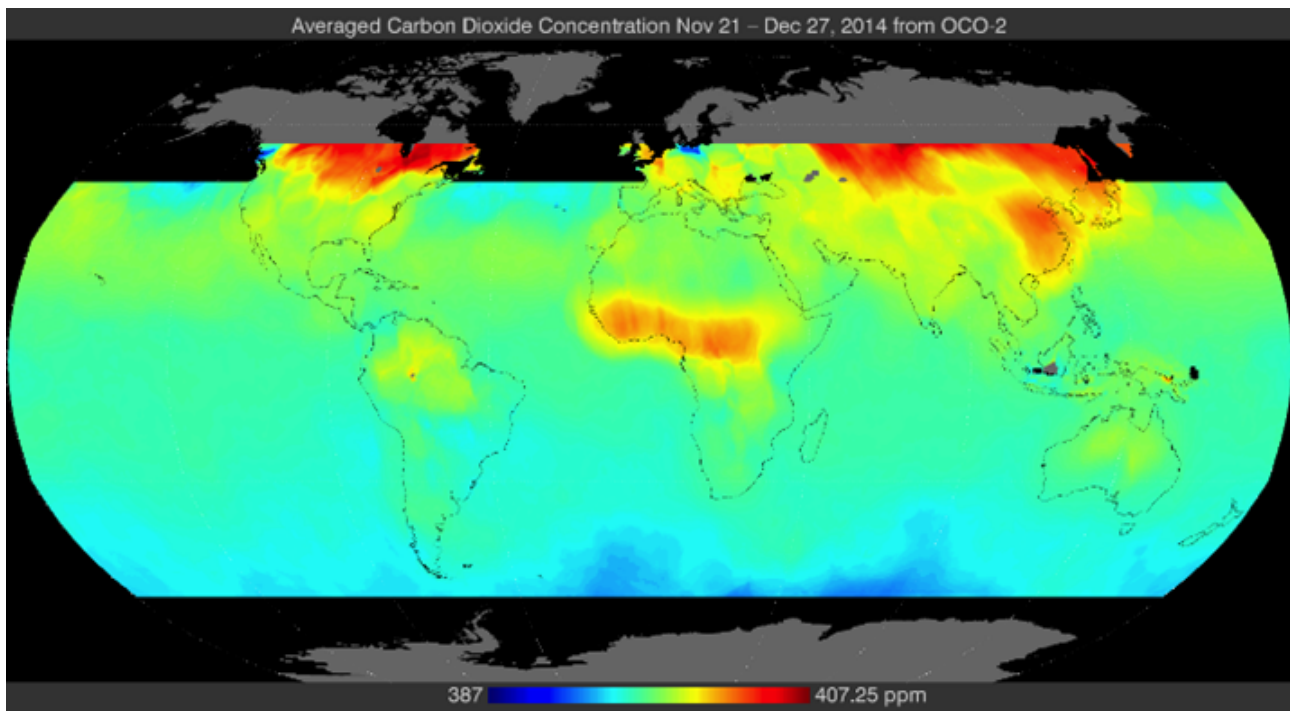
Seit dem Start des Satelliten Orbiting Carbon Observatory-2 (OCO-2) Ende 2014 habe ich viele CO_2 -Karten gesehen. Die meisten von ihnen konnte ich bei einer allgemeinen Online-Suche nicht finden. Auf der OCO-2-Website des NASA JPL waren sie nicht verfügbar. Das gesamte Archiv wurde offenbar neu aufbereitet, aber alles, was ich finden konnte, waren Daten aus den Jahren 2015 bis 2017. Mindestens ein Video wurde von der NASA JPL OCO-2-Website gelöscht (der Link funktioniert nicht). Die neueren Karten sind nicht so benutzerfreundlich wie die ursprünglichen Grafiken, die der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurden. Bei der Suche nach geeigneten OCO-2 CO_2 -Karten haben mich zwei Dinge beeindruckt: 1) Wie schwierig es war, bereits veröffentlichte Karten zu finden, und 2) wie groß die Unterschiede zwischen den wenigen verfügbaren Karten waren.

Obwohl CO₂ innerhalb der Grenzen der quantitativen Auflösung als „gut durchmischt“ bezeichnet wird, variiert die Konzentration, der Ort und die Jahreszeiten erheblich. Die früheste CO₂-Karte des OCO-2-Satelliten ist für diese Diskussion wahrscheinlich am nützlichsten, da sie die Verteilung der Konzentrationen für einen 5-Wochen-Zeitraum während des Beginns (Tiefpunkt) der saisonalen Anstiegsphase für die Nordhemisphäre (NH) zeigt.

Abbildung 1a (unten) ist die erste Veröffentlichung von OCO-2-Daten auf der Tagung der Amerikanischen Geophysikalischen Union 2014. Es scheint, dass die Hauptquellen auf dem Land liegen, wie das Amazonasbecken und das südliche Afrika, mit sekundären Quellen aus Ausgasungen in den Ozeanen in einem äquatorialen Gürtel. Dies sind keine Regionen mit hoher Bevölkerungsdichte oder konzentrierten industriellen Aktivitäten.

Abbildung 1b, die mit Daten von etwa zwei Monaten später erstellt wurde, zeigt, wie sehr sich die Lage der wichtigsten Quellen in nur einem Monat in der frühen NH-Hochlaufphase verändert hat. Keiner der roten und nur ein kleiner Teil der gelben Einträge stammt von Autos oder Fabriken. Natürliche biogene Quellen in Verbindung mit verrottendem Kompost, der auf dem Boden liegt, und die Atmung immergrüner Bäume, insbesondere in den borealen Wäldern Nordamerikas und Sibiriens, dominieren eindeutig die Quellen der nördlichen Hemisphäre. Die Ausgasungen aus den tropischen Ozeanen sind verschwunden, vielleicht weil es noch früh im Winter ist und die Oberflächengewässer abgekühlt sind. Es scheint, dass es immer noch ein Band nördlicher CO₂-Quellen aus dem Ozean gibt, das jedoch möglicherweise das Ergebnis von abgestorbenem, sich zersetzendem Phytoplankton ist, das sich immer noch nahe der Oberfläche befindet.





Abbildungen 1a und 1b. CO₂-Karten des Satelliten OCO-2. (Quelle: NASA JPL)

Die Kurve für die CO₂-Anstiegsphase 2014-2015 (siehe Abbildung 2 unten) ist typisch für die letzten 30 Jahre, auch wenn das Maximum im Mai niedriger ist als in den letzten Jahren. Das folgende Jahr war jedoch ein El-Niño-Jahr, und das Mai-Hoch war typisch für die letzten Jahre. Dies deutet darauf hin, dass die Temperatur die CO₂-Konzentration steuert.

Man beachte, dass die Abweichungen von den linearen Regressionslinien in den meisten Jahren wiederkehren und nicht nur zufällige Schwankungen der interannuellen Varianz sind.

Grundsätzlich scheint es so zu sein, dass der CO₂-Anstieg, wie er in der Herbst-Frühjahrs-Anstiegsphase zu beobachten ist, nicht durch die Abstiegsphase im Sommer ausgeglichen wird, obwohl die Steigung der Sommerkurve steiler ist.

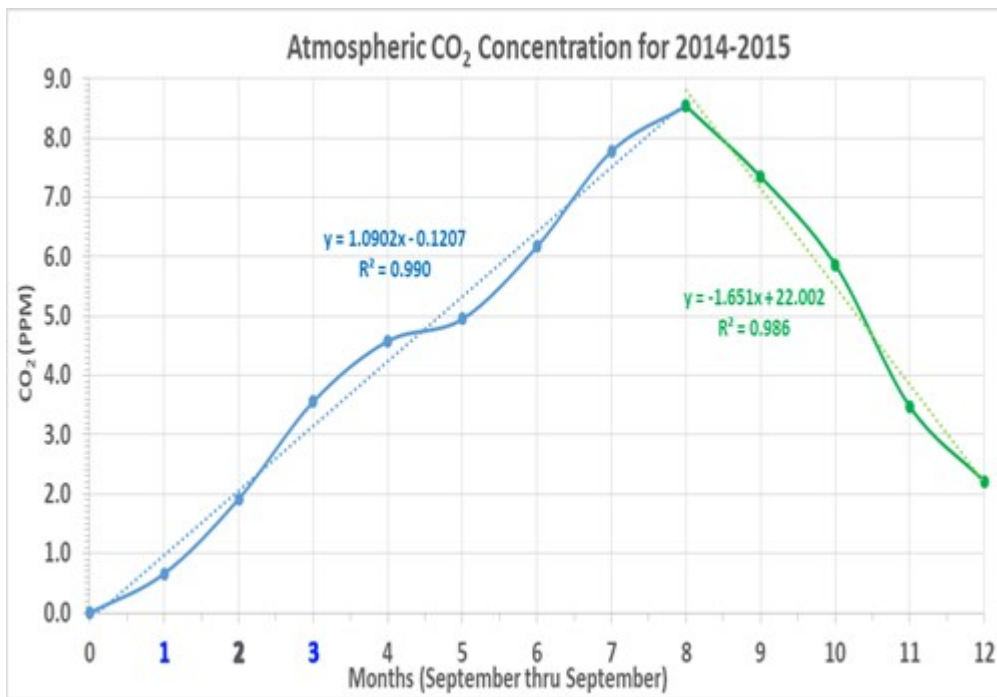


Abbildung 2. CO₂-Konzentrationen 2014-2015 in der Hochlauf- und Absenkphase.

Die blau markierten Monate (1 & 3) entsprechen den beiden Karten in Abb. 1a und 1b.

SUMMARY TIME (und das Leben ist einfach)

Die wichtigsten CO₂-Quellen sind während der saisonalen Hochlaufphase räumlich nicht mit hohen Bevölkerungsdichten oder industriellen Aktivitäten verbunden, mit der möglichen Ausnahme von China.

Es ist unwahrscheinlich, dass mehr als ein kleiner Teil der jährlichen anthropogenen Emissionen in der Atmosphäre verbleibt, da ihr Anteil am gesamten jährlichen Quellenfluss <4% beträgt. Die Feststellung, dass der jährliche Anstieg der atmosphärischen CO₂-Konzentration etwa die Hälfte der anthropogenen Emissionen beträgt, ist wahrscheinlich eine Scheinkorrelation.

Die Bilanzierung der Veränderung der atmosphärischen CO₂-Isotopenzusammensetzung infolge der Emissionen fossiler Brennstoffe ist nicht für alle potenziellen Quellen der Isotopenfraktionierung eindeutig.

Eine alternative Interpretation des derzeitigen Paradigmas ist, dass die Erwärmung der Erde vor dem Hintergrund relativ konstanter anthropogener Emissionen eine Zunahme der Ausgasung aus dem Ozean und der biogenen Emissionen während der saisonalen CO₂-Anstiegsphase bewirkt. Während der Absenkungsphase sind die sich erwärmenden Gewässer in den hohen Breitengraden weniger effektiv in der Lage, das CO₂ in der Atmosphäre zu binden. Außerdem führt das erhöhte CO₂ in der Atmosphäre während der

Absenkungsphase zu einem verstärkten Wachstum der Vegetation und des photosynthetischen Planktons, das jedoch nur ausreicht, um eine CO₂-Menge zu binden, die etwa der **Hälfte** der jährlichen anthropogenen Emissionen entspricht. Ohne anthropogene Emissionen könnte man daher erwarten, dass die Zunahme des atmosphärischen CO₂ 96 % des derzeitigen jährlichen CO₂-Gesamtflusses ausmacht. Der durchschnittliche jährliche Nettoanstieg des atmosphärischen CO₂ beträgt in den letzten 30 Jahren etwa 1,8 PPM. Daher könnte man erwarten, dass der jährliche Anstieg ohne anthropogenes CO₂ bei etwa 1,7 PPM liegen würde. Da fossile Brennstoffe jedoch nur etwa 95 % der anthropogenen Emissionen ausmachen und es nicht praktikabel ist, die Herstellung von Zement und die Verwendung von CO₂ als industrieller Rohstoff einzustellen, wäre der jährliche Nettozuwachs etwas größer als 1,7 PPM. Es ist also nicht zu erwarten, dass selbst eine drastische Verringerung der anthropogenen CO₂-Emissionen mehr als vernachlässigbare Auswirkungen haben wird!

Wenn die Temperaturen sinken, spricht man von Wetter, wenn sie aber steigen, von Klima. Ähnlich verhält es sich mit dem CO₂ in der Atmosphäre. Wenn die Konzentrationen in der Atmosphäre steigen, wird behauptet, dass dies ausschließlich auf die zunehmenden anthropogenen Emissionen zurückzuführen ist. Wenn die anthropogenen Emissionen zurückgehen, heißt es, dass die natürliche Variabilität den erwarteten Rückgang verdeckt.

CITATION TIME

Brandon Kieft, Zhou Li, Samuel Bryson, Robert L. Hettich, Chongle Pan, Xavier Mayali, Ryan S. Mueller (2021). Phytoplankton exudates and lysates support distinct microbial consortia with specialized metabolic and ecophysiological traits. *Proceedings of the National Academy of Sciences* Oct 2021, 118 (41) e2101178118; DOI: 10.1073/pnas.2101178118 <https://www.pnas.org/content/pnas/118/41/e2101178118.full.pdf>

Doctor, D. H., Kendall, C., Sebestyen, S. D., Shanley, J. B., Ohte, N., & Boyer, E. W. (2008). Carbon isotope fractionation of dissolved inorganic carbon (DIC) due to outgassing of carbon dioxide from a headwater stream. *Hydrological Processes*, 22(14), 2410-2423. <https://doi.org/10.1002/hyp.6833>

Mayorga, E., A.K. Aufdenkampe, C.A. Masiello, A.V. Krusche, J.I. Hedges, P.D. Quay, J.E. Richey, and T.A. Brown. (2012). LBA-ECO CD-06 Isotopic Composition of Carbon Fractions, Amazon Basin River Water. Data set. Available on-line [<http://daac.ornl.gov>] from Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center, Oak Ridge, Tennessee, U.S.A. <http://dx.doi.org/10.3334/ORNLDAAC/1120>

Wanninkhof, Rik (1985) Kinetic fractionation of the carbon isotopes ¹³C and ¹²C during transfer of CO₂ from air to seawater, *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 37:3,

128-135, DOI: 10.3402/tellusb.v37i3.15008

<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.3402/tellusb.v37i3.15008>

Link:

<https://wattsupwiththat.com/2021/12/16/co2-party-having-fun-with-probabilities/>

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE