

Historischer CO₂-Verlauf aus Eisbohrkernen

geschrieben von Chris Frey | 25. Juni 2022

Renee Hannon

Introduction

In diesem Beitrag werden die Probenabstände für CO₂-Messungen in antarktischen Eisbohrkernen während der letzten 800.000 Jahre untersucht, um besser zu verstehen, ob die Lücken in den Probenahmen zu groß sind, um hundertjährige Schwankungen zu erfassen. Das IPCC stellt fest:

„Obwohl die Eiskernaufzeichnungen aufgrund der Gasdiffusion und der allmählichen Schließung der Blasen in der Schneeschicht über dem Eisschild tiefpassgefilterte Zeitreihen darstellen (Fourteau et al., 2020), ist die Anstiegsrate seit 1850 n. Chr. (etwa 125 ppm Anstieg über etwa 170 Jahre) weitaus größer als die 170-Jahres-Periode, die durch Eiskernaufzeichnungen für die letzten 800.000 Jahre (sehr hohes Vertrauen) impliziert wird.“

AR6 Climate Change 2021, Kapitel 2 IPCC 2.2.3.2.1.

Abbildung 1a zeigt die vom IPCC ermittelten CO₂-Schwankungen über die letzten 800.000 Jahre. Dies erscheint wie eine kontinuierliche und gleichmäßig abgetastete Linie, ist es aber nicht. Eiskerne werden an einzelnen Stellen entlang des Kerns auf CO₂ untersucht. In Abbildung 1b sind die einzelnen CO₂-Datenpunkte dargestellt, wobei offensichtliche Lücken von bis zu Hunderten von Jahren zwischen den Proben zu erkennen sind.

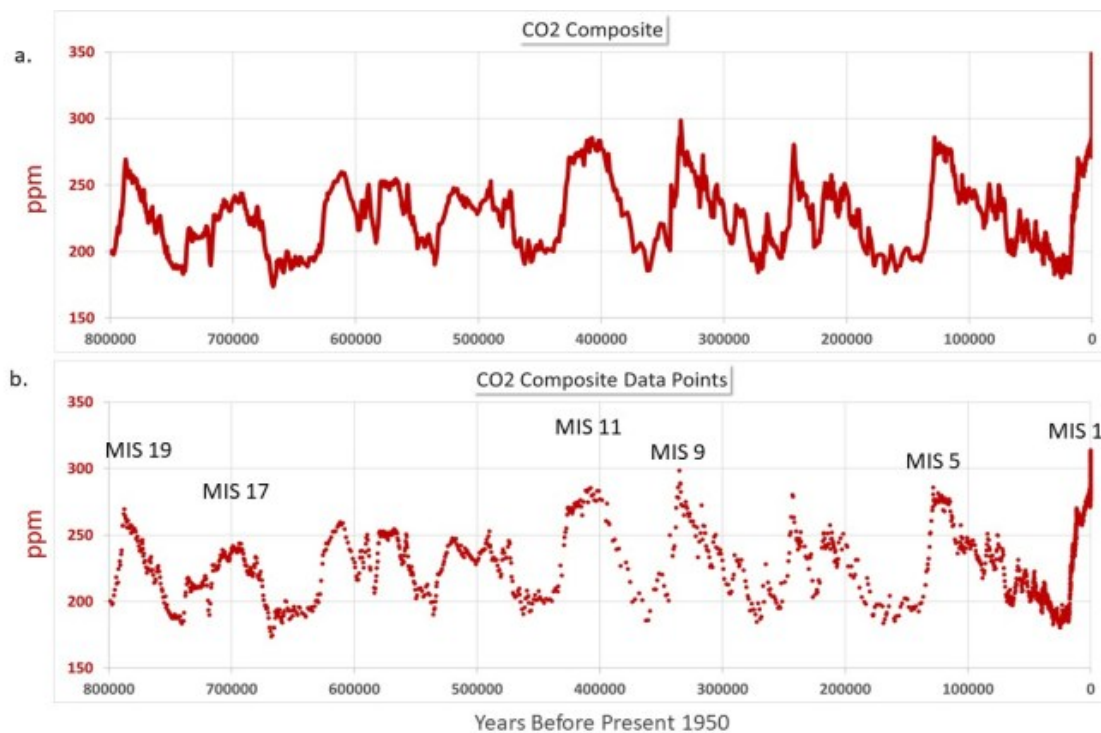


Abbildung 1. a) Abbildung 2.4a des IPCC, die CO₂-Eiskernmessungen während der letzten 800.000 Jahre aus Kapitel 2 des AR6 Climate Change 2021 zeigt. Daten aus Bereiter, 2015. b) CO₂-Datenpunkte, die die in der IPCC-Abbildung 2.4a gezeigte dicke CO₂-Linie bilden. Das maritime Isotopenstadium (MIS) ist für die wichtigsten Interglaziale dargestellt.

CO₂-Probenlücken übersteigen die instrumentellen Aufzeichnungen

Die Proben für CO₂-Messungen werden entlang der Eiskerne in Abständen von 50 cm bis zu über 10 Metern entnommen (siehe Abbildung 2). Es scheint keinen Standard- oder Routineabstand für die Auswahl der Proben zu geben, und die Häufigkeit der Probenentnahme wird wahrscheinlich eher von der Finanzierung der Studie und/oder den Forschungsinteressen bestimmt. Die Probenabstände bei den Bohrkernen des holozänen MIS 1 sind gut und reichen von 20 cm bis 3 m.

Es gibt zwei Bohrkern, die lang genug sind, um ältere Abschnitte einschließlich MIS 5 und darüber hinaus abzudecken: Vostok und Dome C. Vostok (hellorange) ist ein weit verbreiteter öffentlicher CO₂-Datensatz, weist aber den größten Abstand zwischen den Proben auf, der von 2 m bis zu mehr als 18 m reicht (es muss Wodka im Spiel gewesen sein). Der Abstand zwischen den Proben von Dome C im älteren Abschnitt von MIS 9 bis MIS 19 ist sehr gut und beträgt weniger als 1 m.

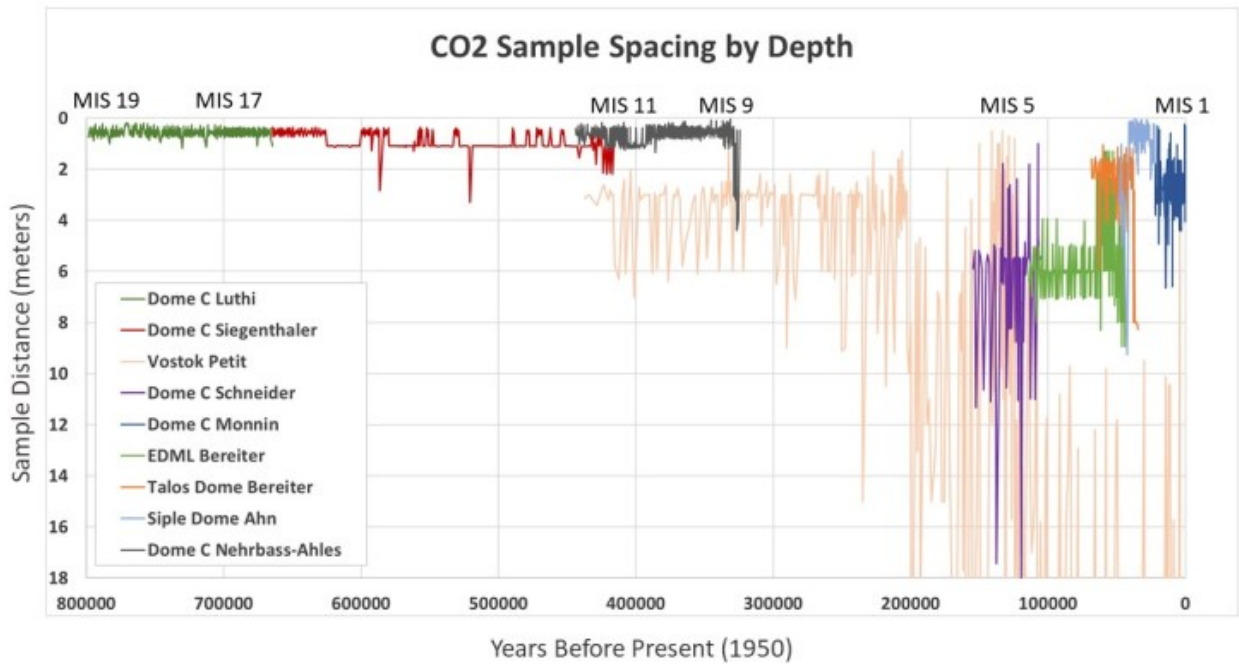


Abbildung 2. CO₂-Probenabstände in der Tiefe (Meter) aus antarktischen Eisbohrkernen über die letzten 800.000 Jahre. Daten aus Bereiter, 2015 und zusätzliche höher aufgelöste Daten aus einer aktuellen Studie von Nehrass-Ahles, 2020.

Untersuchen wir die Proben, die von der Tiefe in die Zeit umgerechnet wurden, was für die Identifizierung von hundertjährigen CO₂-Schwankungen und -Trends entscheidend ist. Abbildung 3 zeigt die Probenabstände in Jahren über die letzten 800.000 Jahre. Das 200-Jahres-Intervall ist hervorgehoben, weil es etwas länger ist als der moderne CO₂-Anstieg über den letzten 170-Jahres-Zeitraum, der vom IPCC angegeben wird. Es gibt nur minimale Zeiträume, in denen der Abstand zwischen den CO₂-Proben der Eiskerne weniger als 200 Jahre beträgt: durchgängig von 0 bis 60.000 Jahren BP, sporadisch (12 Proben) zwischen 125.000 und 140.000 Jahren BP und sporadisch zwischen 330.000 und 400.000 Jahren BP. Auch hier ist zu beachten, dass die Vostok-CO₂-Aufzeichnungen die schlechteste zeitliche Auflösung aufweisen.

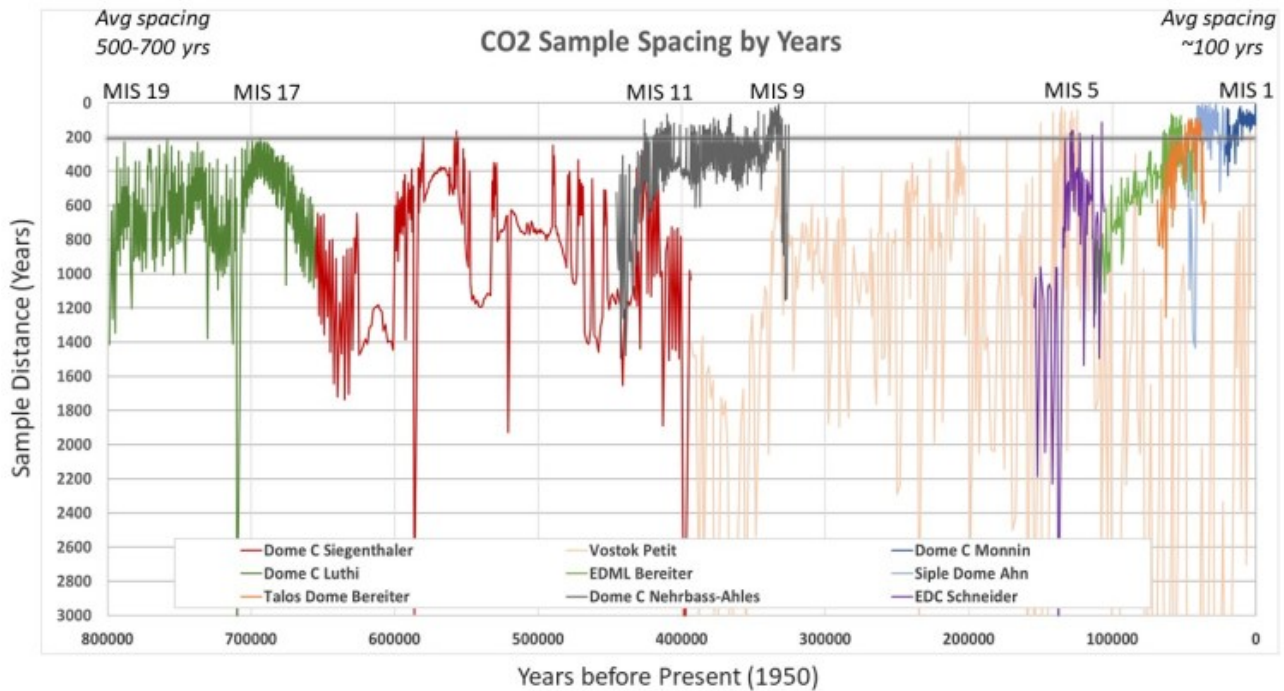


Abbildung 3. CO₂-Probenabstände in antarktischen Eisbohrkernen, umgerechnet in Jahre aus Bereiter, 2015 und Nerbass-Ahles, 2020. Beachten Sie, dass die y-Skala invertiert ist, was trotz ähnlicher Probentiefen eine höhere zeitliche Auflösung über interglaziale (höher) als über glaziale (niedriger) Perioden bedeutet.

Die Proben von Dome C in der Monnin-Studie über MIS 1 weisen im Durchschnitt 72-jährige Probenabstände für CO₂ auf und sind recht gut. Joos (2008) bestätigt, dass die Probenabstände für CO₂ während des holozänen MIS 1 100 Jahre oder weniger und während des letzten Deglazials etwa 200 Jahre betragen. Er stellt außerdem fest, dass die CO₂-Probenahmeabstände für die Aufzeichnungen von Law Dome und Firn in den letzten 2000 Jahren nach Christus sogar noch kürzer sind, nämlich 30 bis 60 Jahre.

Die jüngste Studie von Nerbass-Ahles für MIS 9 bis MIS 11 weist einen durchschnittlichen Probenabstand oder eine zeitliche Auflösung von 300 Jahren auf. Der Zeitrahmen von MIS 17 bis MIS 19 hat eine durchschnittliche Auflösung von 570 Jahren und zwischen MIS 11 und MIS 17 beträgt sie 731 Jahre (Luthi, 2008, Siegenthaler, 2005). Die große zeitliche Lücke zwischen den Stichproben bietet kaum eine Chance, hundertjährige CO₂-Schwankungen mit Datensätzen während MIS 5 und älter zu beobachten.

Nerbass-Ahles kommt zu dem Schluss, dass Hundertjahressprünge ein allgegenwärtiges Merkmal des natürlichen Kohlenstoffkreislaufs sind, das in CO₂-Eiskernaufzeichnungen mit unzureichender zeitlicher Auflösung unentdeckt bleibt. Sie stellen fest, dass CO₂-Variabilität im submillennialen Maßstab nur für die letzten 60.000 Jahre vor Christus verfügbar ist.

Lücken in der Probenahme erschweren die Glättung des CO₂-Firns in Eiskernen

Die Auflösung von Eiskerndaten wird sowohl durch die zeitliche Abtastung als auch durch die Firngasdiffusion unterdrückt. Die Auflösung der Probenahme wurde oben ausführlich erörtert, aber es lohnt sich, auch die Glättung des Firngases zu diskutieren.

Viele Autoren haben eine Gasglättung in der Firnschicht aufgrund vertikaler Gasdiffusion und allmählicher Schließung der Blasen beim Übergang von Firn zu Eis dokumentiert (Trudinger, 2002; Joos und Spahni, 2008; Ahn, 2012; Fourteau, 2020; IPCC, 2021). Um Kerne von Standorten mit unterschiedlicher Schnee- und Eisakkumulation zu kompensieren wird eine Gasaltersverteilungsbreite oder Glättung modelliert. So haben beispielsweise die Law Dome- und WAIS-Kerne mit hoher Akkumulation ein durchschnittliches Gasalter von 10-15 Jahren bzw. 30 Jahren. Standorte mit geringer Akkumulation wie Dome C und Vostok enthalten Gas, das über Hunderte von Jahren gemittelt oder geglättet ist. Nach Monnin 2001 ist Dome C im Holozän etwa 200 Jahre geglättet, und die Glättung steigt während des letzten glazialen Maximums (LGM) auf 550 Jahre.

Fourteau sagt dazu Folgendes:

„Bei Kohlendioxid scheint die Glättung der Firne die aufgezeichneten Änderungsraten bei abrupten CO₂-Anstiegen im Vergleich zu ihren atmosphärischen Werten erheblich zu verringern. Die Schätzungen der CO₂-Änderungsraten werden durch den Prozess der diskreten Messung weiter verfälscht, und die gemessenen Werte können dreimal niedriger sein als die tatsächliche atmosphärische Änderungsrate.“ – Fourteau, 2020

Abbildung 4 fasst die wichtigsten Eiskerne zusammen, die nach der Glättung des Firngases und den durchschnittlichen CO₂-Probenabständen in den letzten 800.000 Jahren farblich gekennzeichnet sind.

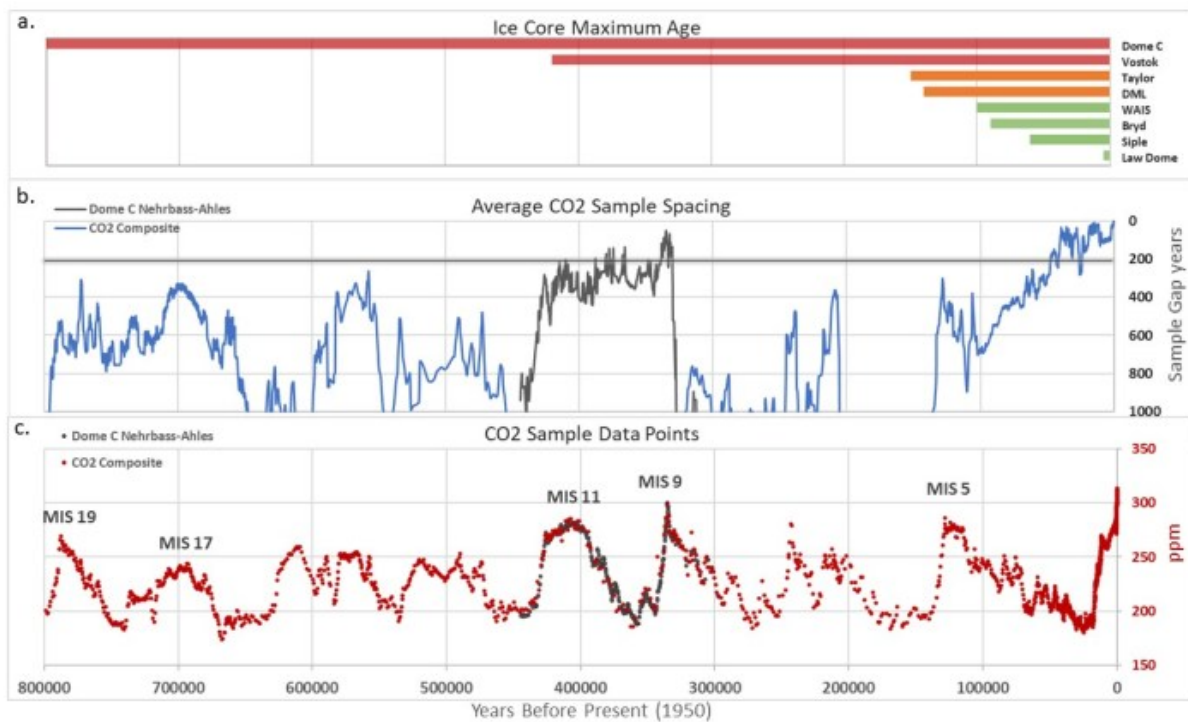


Abbildung 4a: Schlüsseleisbohrkerne mit Angabe der Länge der Bohrintervalle. Die Farben zeigen die Glättung der CO₂-Firndiffusion an, wobei rot für 200 bis 600 Jahre, orange für 60 bis 150 Jahre und grün für 10 bis 50 Jahre steht. Die Durchschnittswerte gehen von 10 % des Gas-Eis-Alter-Deltas aus. 4b: 7-Punkte-Durchschnittsprobenabstand für CO₂-Komposit, Bereiter, 2015 und Nehrass-Ahles, 2020. Beachten Sie, dass 200 Jahre hervorgehoben sind. 4c: Tatsächliche CO₂-Probendatenpunkte über die Zeit aufgetragen.

Abbildung 4a zeigt mehrere hochauflösende Bohrkern aus dem holozänen MIS 1 und der vorangegangenen Eiszeit. Die CO₂-Diffusionsrate im Firn ist gering und die Probenabstände sind gut, 100 Jahre oder weniger. Joos (2009) stellt fest, dass die Probenhäufigkeit in den Eiskernen im Allgemeinen hoch genug ist, um jahrhundertertealte Schwankungen in den letzten 22 000 Jahren zu erfassen. Er stellt außerdem fest, dass der CO₂-Anstieg im 20. Jahrhundert um mehr als eine Größenordnung höher ist als jede anhaltende Veränderung in den letzten 22 000 Jahren. Und Nehrass-Ahles, 2020, stimmt zu, dass CO₂-Schwankungen im submillennialen Maßstab nur für die letzten 60.000 Jahre verfügbar sind. Sechzigtausend Jahre sind jedoch weniger als 10 % der 800.000-jährigen Eiskernaufzeichnungen.

Im Gegensatz dazu gibt es eine begrenzte Anzahl von Eiskernen, die 100.000 bis 800.000 Jahre zurückreichen, nämlich Dome C und Vostok. Aufgrund der Firndiffusion an diesen Orten mit geringer Akkumulation wird das CO₂ geglättet und über Hunderte von Jahren gemittelt. Im besten Datensatz über MIS 11 bis MIS 9 wird das CO₂ über 200 Jahre geglättet und dann in 300-Jahres-Schritten abgetastet. Sowohl die Glättung der Firnschicht als auch die Abstände zwischen den Proben sind größer als der vom IPCC angegebene moderne 170-Jahres-Zeitraum.

Typisch für älteres, dünner werdendes Eis ist der Abstand zwischen den Proben in Jahren sogar noch größer. Der Probenabstand zwischen MIS 17 und MIS 19 beträgt im Durchschnitt 570 Jahre (Luthi, 2008), und zwischen MIS 11 und MIS 17 beträgt der Probenabstand im Durchschnitt 730 Jahre (Siegenthaler, 2005). Etwa 75 % der 800.000 Jahre alten Eiskernaufzeichnungen werden in Abständen von mehr als 400 Jahren entnommen (siehe Abbildung 4b). Das entspricht zwei Proben oder weniger in einem 1000-jährigen Eiskernintervall, was kaum ausreicht, um einen Jahrtausendtrend zu ermitteln.

Probe-Entnahmeverfahren können das hundertjährige Signal eliminieren, wenn sie als Rauschen interpretiert werden.

Ein letzter Hinweis zu den Probe-Entnahmeverfahren. In der Regel werden vier bis sechs CO₂-Proben innerhalb einer Kernlänge von 60 bis 100 mm entnommen, um die Wiederholbarkeit zwischen verschiedenen Labors und den Zeitablauf zu untersuchen (Monnin, 2001). Datenpunkte können aufgrund offensichtlicher Verunreinigungen oder Frakturen verworfen werden. Ein Datenpunkt kann auch als Rauschen zurückgewiesen werden, weil er eine höhere Standardabweichung aufweist als die Forscher für angemessen halten (Ahn, 2012). Der letzte aufgezeichnete Datenpunkt ist in der Regel keine tatsächliche Messung von CO₂. Der endgültige Datenpunkt stellt einen CO₂-Mittelwert dar, der aus den eng beieinander liegenden Proben mit einem Sigma-Mittelwert von typischerweise weniger als 1,5 ppm abgeleitet wird. Daher können CO₂-Messungen als „Ausreißer“ betrachtet werden, die nicht verwendet werden und als Rauschen gelten.

Die Wissenschaftler können die endgültigen Datenpunkte auch einer zusätzlichen Prüfung unterziehen, z. B. mit dem von Mitchell beschriebenen statistischen Verfahren:

„Falls der Punkt außerhalb der Summe aus der doppelten Standardabweichung eines Monte-Carlo-Splines und der doppelten Standardabweichung des Punktes selbst lag, wurde er als statistischer Ausreißer identifiziert.“ – Mitchell, 2013

Eine offensichtliche Frage ist, ob die Wissenschaftler CO₂-Ausschläge auf der Hundertjahresskala entfernen, indem sie Proben als statistische Ausreißer im Vergleich zu den benachbarten Proben zurückweisen. Würde der CO₂-Anstieg seit 1850 durch den Monte-Carlo-Filter von Mitchell entfernt werden?

Beobachtungen

Die Aussage des IPCC, dass:

„Die Anstiegsrate seit 1850 n. Chr. (etwa 125 ppm Anstieg über etwa 170 Jahre) weitaus größer ist als für jeden 170-Jahres-Zeitraum durch Eiskernaufzeichnungen impliziert, die die letzten 800 ka abdecken (sehr hohes Vertrauen)“ – AR6 Climate Change 2021, Kapitel 2 IPCC 2.2.3.2.1, Seiten 2-17, 2-18 erscheint irreführend und unvereinbar mit den

Einschränkungen der antarktischen Eiskernaufzeichnungen. Allein aufgrund der Probenabstände liegen nur 10 % der Eiskernaufzeichnungen weniger als 200 Jahre auseinander und etwa 75 % liegen mehr als 400 Jahre auseinander. Hinzu kommt die zusätzliche Komponente der CO₂-Glättung um 200 bis 600 Jahre aufgrund der Firngasdiffusion in Eiskernaufzeichnungen, die älter als 100.000 Jahre sind.

CO₂-Aufzeichnungen aus Eisbohrkernen sind unvollkommene Daten. Sie sind aufgrund der Firndiffusion und der geringen Probenhäufigkeit gedämpft. Diese Daten sollten nur mit einem „Fit for Purpose“-Ansatz verwendet werden. Grundsätzlich sind antarktische Eisbohrkerne für die Bewertung von CO₂-Jahrtausendrends nützlich. Ihre schlechte Auflösung aufgrund der Glättung von Firn, der Glättung der Vergrabungstiefe und der oft geringen Probenabstände wird niemals mit Sicherheit hundertjährige CO₂-Schwankungen auflösen, obwohl der IPCC behauptet, dass dies mit „sehr hohem Vertrauen“ möglich ist.

Die globalen CO₂-Schwankungen des Paläoklimas sollten mehrere Datensätze umfassen und nicht nur antarktische Eisbohrkerne. Für hundertjährige CO₂-Schwankungen müssen Datensätze einbezogen werden, die eine höhere Variabilität erfassen, wie etwa grönländische Eiskerne mit höherer Auflösung sowie Daten über die Spaltöffnungen von Pflanzen. Um es klar zu sagen: Alle Datensätze mit CO₂-Proxy-Messungen haben ihre Probleme und Grenzen. Bei Verwendung von Daten mit höherer Auflösung gibt es hundertjährige CO₂-Fluktuationen, die in Umfang und Anstiegsgeschwindigkeit mit den modernen Fluktuationen vergleichbar sind, wie in meinem früheren Beitrag [hier](#) beschrieben.

Acknowledgements: Special thanks to Donald Ince and Andy May for reviewing and editing this article.

Download the bibliography [here](#).

Link:

<https://andymaypetrophysicist.com/2022/06/23/co2-sample-spacing-in-ice-cores/>

Übersetzt von Christian Freuer für das EIKE