The Clean Paper

WHAT THE PAPER SAYS · WHAT IT DOESN'T · WHY IT MATTERS

Wie lange kann die Erde grün bleiben? Ein Klimamodell liefert Spannweiten, kein Weltuntergangsdatum

Neunundzwanzig dreidimensionale Klimasimulationen setzen unterschiedliche Grenzen für die photosynthetische Biosphäre der Erde in etwa 1,35 bis 1,87 Milliarden Jahren. Die Werte hängen von bewusst vereinfachten Verläufen der Gesteinsverwitterung, der Erwärmung und den niedrigsten Kohlendioxidkonzentrationen ab, die Pflanzen möglicherweise nutzen können. Sie sagen nicht voraus, wann alle Pflanzen, alles Leben, die Zivilisation oder der Planet enden.

Written by Cinzia Vaglio · Cross-checked by Matteo · Edited by Michele Renda · Figures by Cinzia Vaglio and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere*, Jacob Haqq-Misra and Eric Wolf, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026) · DOI: 10.1029/2025JD045586

Wie lange kann die Erde grün bleiben? Ein Klimamodell liefert Spannweiten, kein Weltuntergangsdatum

Ein Blatt lebt innerhalb eines engen Kompromisses. Es braucht Licht, Wasser, Kohlendioxid und eine Temperatur, die seine Chemie verträgt. Über ein Menschenleben hinweg wirkt die Sonne wie der unveränderliche Teil dieses Kompromisses. Über eine Milliarde Jahre ist sie das nicht.

Während die Sonne auf der Hauptreihe altert, wird sie langsam heller. Mehr Sonnenlicht erwärmt die Erde, doch der Planet besitzt eine langfristige Reaktion: Reaktionen zwischen Regenwasser, Kohlendioxid und Silikatgesteinen können Kohlendioxid aus der Atmosphäre entfernen. Das schwächt den Treibhauseffekt und gleicht einen Teil der Erwärmung aus. Dieselbe Reaktion, die den Planeten kühlt, kann photosynthetischen Organismen schließlich den Kohlenstoff entziehen, aus dem sie lebendes Gewebe aufbauen.

Eine neue Arbeit im Journal of Geophysical Research: Atmospheres fragt, welche Grenze zuerst erreicht werden könnte: zu viel Hitze oder zu wenig Kohlendioxid. Ihre Antwort ist kein Datum, an dem die Erde stirbt. Über zwei bewusst vereinfachte Zukunftspfade hinweg liegen die gewählten Grenzen für photosynthetisches Leben ungefähr **1,35 bis 1,87 Milliarden Jahre in der Zukunft**.

Diese Spannweite betrifft die **vegetative Biosphäre**: den Teil des lebenden Systems der Erde, der von photosynthetischen Organismen getragen wird, insbesondere von Pflanzen und anderem Leben, das Licht und Kohlendioxid in biologisches Material umwandelt. Sie ist keine Vorhersage für jede Mikrobe. Sie ist nicht die Lebensdauer der menschlichen Zivilisation. Sie ist nicht die Lebensdauer des Planeten.

Der planetare Thermostat hat zwei unsichere Einstellungen

Die zentrale Unsicherheit ist die **Silikatverwitterung**. Kohlendioxid löst sich in Regenwasser, reagiert mit Silikatgesteinen und wird schließlich in Richtung Ozeane und Sedimente transportiert. Vulkane führen über geologische Zeiträume Kohlendioxid zurück. Zusammen bilden diese Prozesse einen Teil des Karbonat-Silikat-Zyklus, der oft als planetarer Thermostat beschrieben wird.

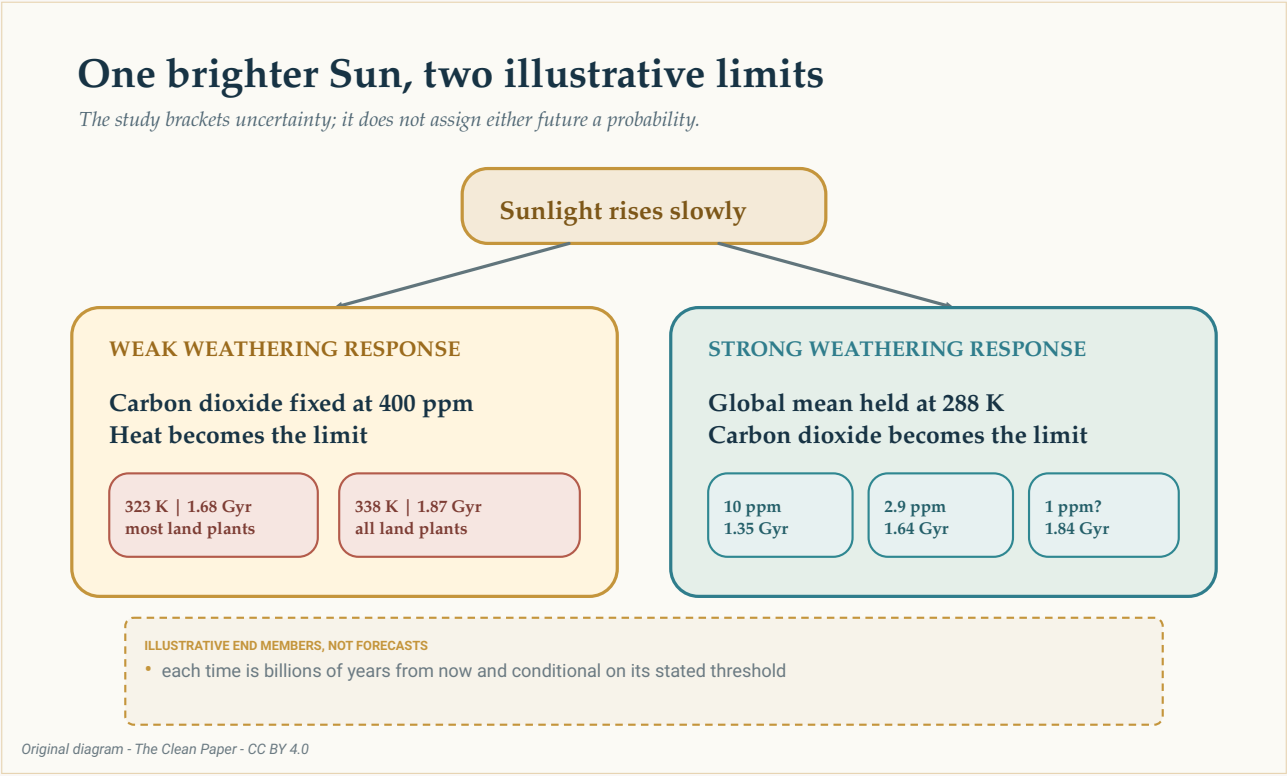
In einer wärmeren, feuchteren Welt könnte die Verwitterung schneller ablaufen und Kohlendioxid rascher entfernen. Wissenschaftler wissen jedoch nicht, wie stark diese Reaktion die Erde unter einer künftig helleren Sonne bestimmen wird. Jacob Haqq-Misra und Eric Wolf wählten deshalb nicht einen vermeintlich korrekten Verlauf. Sie modellierten zwei **Grenzfälle**: bewusst extreme Fälle, die die Unsicherheit eingrenzen sollen.

- Im **Grenzfall schwacher Verwitterung** bleibt das atmosphärische Kohlendioxid bei 400 Teilen pro Million, während die heller werdende Sonne die Temperatur erhöht.
- Im **Grenzfall starker Verwitterung** bleibt die globale mittlere Oberflächentemperatur bei 288 Kelvin, ungefähr 15 Grad Celsius, während Kohlendioxid mit zunehmender Sonneneinstrahlung abgebaut wird.

Keiner der beiden Zweige wird als tatsächliche Zukunft der Erde dargestellt. Der erste fragt, was Hitze bewirken würde, wenn das Kohlendioxid hoch bliebe. Der zweite fragt, was Kohlenstoffmangel bewirken würde, wenn die Verwitterung die globale Temperatur nahe dem heutigen Mittel hielte.

Wie kann Verwitterung wie ein Thermostat wirken?

Die Analogie betrifft eine Rückkopplung, keinen buchstäblichen Regler. Wenn ein wärmeres Klima die chemische Verwitterung beschleunigt, kann mehr atmosphärisches Kohlendioxid in gelösten Stoffen, Mineralen und Sedimenten enden. Das Entfernen dieses Treibhausgases wirkt einem Teil der ursprünglichen Erwärmung entgegen. Über sehr lange Zeiträume führen vulkanische Ausgasungen Kohlendioxid zurück.
Die Stärke jedes Glieds hängt von Niederschlag, freiliegendem Gestein, Erosion, Biologie, Tektonik und Ozeanchemie ab. Deshalb testet die Arbeit begrenzende Reaktionen, statt den Thermostat als bekannte Maschine zu behandeln.



Die Arbeit grenzt eine unsichere Zukunft mit zwei illustrativen Grenzfällen ein. Reagiert die Verwitterung schwach, erreicht die steigende Hitze die gewählten Schwellen für Landpflanzen. Reagiert sie stark, erreicht das sinkende Kohlendioxid die gewählten Photosyntheseschwellen. Dies sind bedingte Modellzweige, keine Wahrscheinlichkeiten oder Countdown-Daten.

The Clean Paper CC BY 4.0

Neunundzwanzig eingependelte Modellwelten, kein Zwei-Milliarden-Jahre-Film

Die Forschenden verwendeten ExoCAM, ein dreidimensionales globales Klimamodell, um **29 stationäre Klimazustände** für Kombinationen aus stärkerer Sonneneinstrahlung und niedrigerem Kohlendioxid zu berechnen. Jeder Fall lief 70 Modelljahre. Ein Modelljahr ist hier ein simulierter Jahreszyklus unter konstanten Bedingungen: Es ist Rechenzeit, mit der sich das künstliche Klima einpendeln kann, kein Schritt in einer jahrweisen Vorhersage der Zukunft der Erde. Die letzten 20 Jahre wurden gemittelt, nachdem das simulierte Klima Zeit hatte, sich zu stabilisieren.

Diese 29 Fälle sind getrennte Modellwelten. Jeder Lauf ist ein Punkt in einem Raster und beantwortet die Frage: „Welches eingependelte Klima passt zu diesem gewählten Paar aus Sonneneinstrahlung und Kohlendioxid?“ Der Computer begann nicht mit der heutigen Erde und entwickelte Atmosphäre, Gesteine, Ozeane und Lebewesen für die nächsten zwei Milliarden Jahre kontinuierlich weiter. Stattdessen verfolgten die Autoren die beiden schematischen Verwitterungspfade durch diese vorab berechneten Punkte; der Weg zwischen den Punkten wurde nicht selbst simuliert.

Die Tabelle gibt die Kombinationen aus Sonneneinstrahlung und Kohlendioxid im offiziellen Modelldatenarchiv wieder. Die Fall-IDs wurden hier als Lesehilfe in der Reihenfolge des Archivs hinzugefügt. **S/S0** ist die relative Solarkonstante: die im Modell verwendete einfallende Sonnenenergie geteilt durch ihren heutigen Wert S0. Ein Wert von 1,2 bedeutet daher 20 Prozent mehr einfallende Sonnenenergie als heute. **CO2 (ppm)** ist das atmosphärische Kohlendioxid-Mischungsverhältnis in Molekülen pro Million Atmosphärenmoleküle.

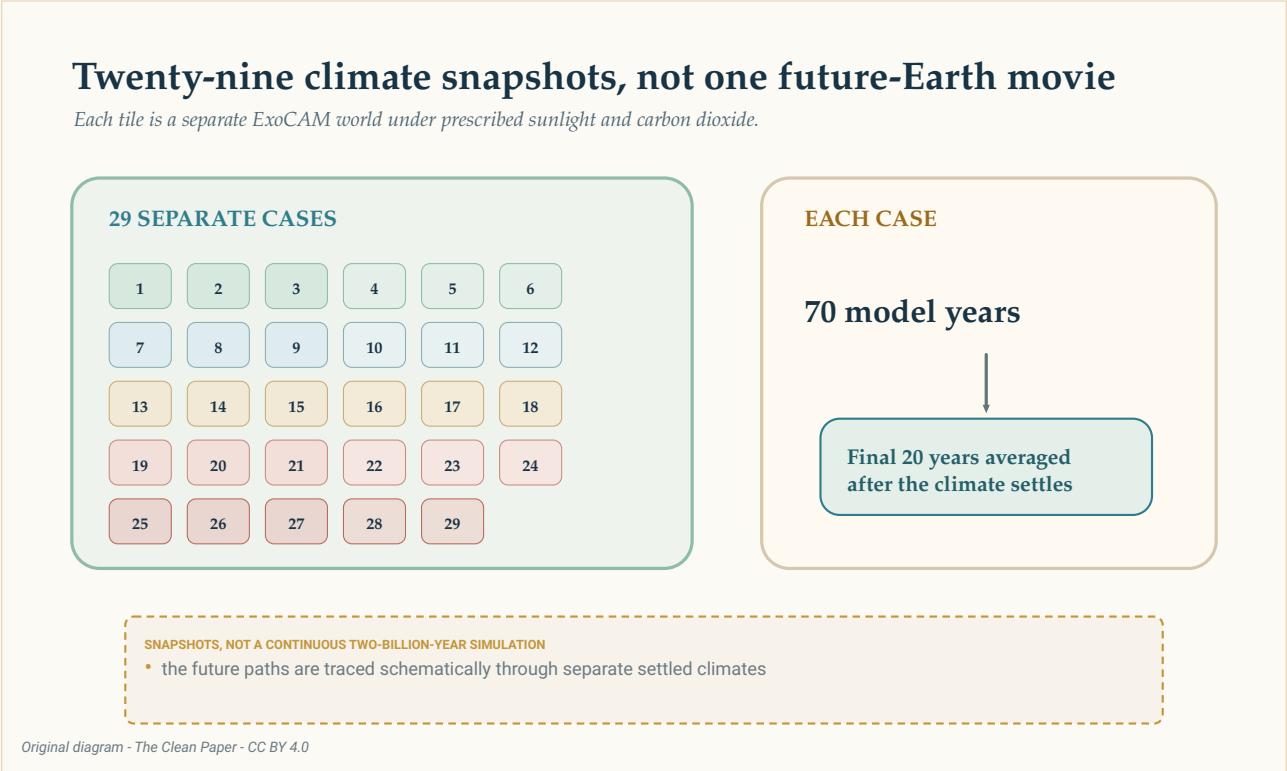
Fall-ID	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400

Fall-ID	S/S0	CO2 (ppm)
20	1.143	180
21	1.143	11.25
22	1.143	6
23	1.143	1.40625
24	1.2	400
25	1.2	180
26	1.2	11.25
27	1.2	1.40625
28	1.2	0.45
29	1.2	0

Die Modellerde ist wiedererkennbar, aber bewusst begrenzt. Sie ist erdgroß und verwendet die heutige Geografie. Sie besitzt einen vereinfachten Schichtozean anstelle eines vollständig zirkulierenden Ozeans, einen Atmosphärendruck ungefähr auf dem heutigen Erdniveau von einem Bar und einen festen Methangehalt. Ihre Umlaufbahn ist vollkommen kreisförmig, also mit Exzentrizität null, und ihre Rotationsachse hat keine Neigung, also Obliquität null. Sie enthält weder explizite Böden und Vegetation noch eine Rückkopplung durch eine sich verändernde Biosphäre. Am wichtigsten ist, dass das Klimamodell nicht dynamisch an ein Gesteinsverwitterungsmodell gekoppelt ist. ExoCAM berechnet also nicht die Verwitterung, aktualisiert damit das Kohlendioxid und startet anschließend das nächste Klima in einer Rückkopplungsschleife. Die Forschenden gaben stattdessen die beiden begrenzenden Pfade vor und verfolgten sie durch das Raster der 29 Klimafälle.

Was bedeutet „stationär“ in einem Klimamodell?

Ein stationärer Fall ist ein Modellklima, das sich unter einer gewählten Sonne und Atmosphäre einpendeln darf. Wetter verändert sich innerhalb der Simulation weiterhin von Tag zu Tag und Jahr zu Jahr, doch seine langfristigen Mittelwerte driften nicht mehr stark.
Das ist nützlich für die Frage: „Welches Klima passt zu diesen Bedingungen?“ Es unterscheidet sich von der Vorhersage des genauen Weges, auf dem sich die reale Erde von einem Bedingungssatz zum nächsten bewegt.



Jede Kachel ist ein eigener ExoCAM-Klimalauf über 70 Modelljahre, wobei die letzten 20 Jahre gemittelt wurden. Die Studie untersuchte 29 eingependelte Klimata für vorgegebene Kombinationen aus Sonneneinstrahlung und Kohlendioxid; sie simulierte nicht eine einzige, sich kontinuierlich über zwei Milliarden Jahre entwickelnde Erde.

The Clean Paper CC BY 4.0

Grenzfall eins: genug Kohlendioxid, zu viel Hitze

Im Zweig schwacher Verwitterung bleibt Kohlendioxid bei 400 Teilen pro Million konstant. Mit zunehmender Sonneneinstrahlung wird Hitze zum begrenzenden Faktor.

Die Arbeit verwendet zwei globale mittlere Temperaturschwellen aus früheren Studien:

- Bei **323 Kelvin**, also ungefähr **50 Grad Celsius** im globalen Jahresmittel, gilt die Welt als zu heiß für die meisten Landpflanzen. Das Modell erreicht diese Schwelle in ungefähr **1,68 Milliarden Jahren**.
- Bei **338 Kelvin**, also ungefähr **65 Grad Celsius** im globalen Jahresmittel, gilt die Welt als zu heiß für alle Landpflanzen. Das Modell erreicht diese Schwelle in ungefähr **1,87 Milliarden Jahren**.

Das sind gewählte biologische Grenzen, keine universellen Temperaturen, bei denen jeder photosynthetische Organismus zwangsläufig versagt. Ein globales Mittel verdeckt außerdem große regionale Unterschiede. Die Studie untersucht gesondert, wo Kombinationen aus Temperatur und Wasser geeignet bleiben könnten, doch eine Kennzeichnung auf einer Klimakarte kann nicht jedes zukünftige Refugium oder jede Anpassung erfassen.

Grenzfall zwei: erträgliche Temperatur, zu wenig Kohlendioxid

Im Zweig starker Verwitterung wird die globale Mitteltemperatur bei 288 Kelvin, etwa 15 Grad Celsius, gehalten, während das atmosphärische Kohlendioxid sinkt. Hier hängt die Antwort davon ab, mit wie wenig Kohlenstoff verschiedene Photosynthesewege möglicherweise auskommen.

- Bei der traditionellen Schwelle von **10 Teilen pro Million** – zehn Kohlendioxidmolekülen pro Million Atmosphärenmoleküle – wird die Grenze für die C4-Photosynthese in ungefähr **1,35 Milliarden Jahren** erreicht. Die C4-Photosynthese wird unter anderem von Mais und Zuckerrohr genutzt und konzentriert Kohlendioxid um das Enzym, das es fixiert.
- Eine in früheren Arbeiten diskutierte alternative C4-Schwelle von **2,9 Teilen pro Million** verschiebt sie auf ungefähr **1,64 Milliarden Jahre**.
- Eine vorläufige Schwelle von **1 Teil pro Million**, die mit einem möglichen Fortbestehen einiger CAM-Pflanzen – Pflanzen mit Crassulaceen-Säurestoffwechsel, die die Kohlendioxidaufnahme in der Nacht von seiner Nutzung am Tag trennen – oder von Wasserpflanzen verbunden ist, die gelöstes Hydrogencarbonat verwenden können, verschiebt sie auf ungefähr **1,84 Milliarden Jahre**.

Die letzte Zahl trägt den größten biologischen Vorbehalt. Die Autoren bezeichnen die Grenze von einem Teil pro Million ausdrücklich als vorläufig. Sie ist keine experimentell bestätigte Überlebensschwelle für alle CAM-Pflanzen oder Wasserpflanzen unter Bedingungen der zukünftigen Erde.

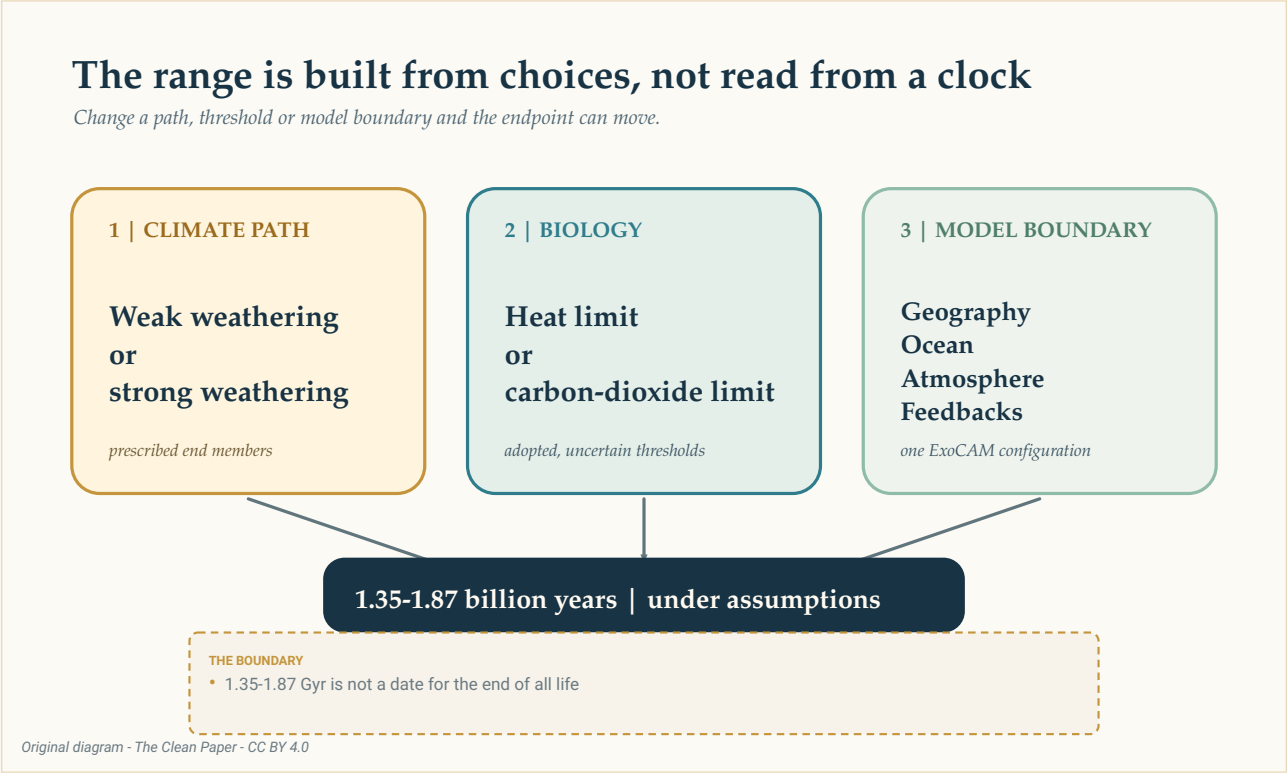
> **C3, C4 und CAM sind Strategien, keine Rangfolge**
>
> Pflanzen nutzen unterschiedliche biochemische Wege, um Kohlenstoff aufzunehmen. Die **C3-Photosynthese** ist am weitesten verbreitet. Die **C4-Photosynthese**, die unter anderem Mais und Zuckerrohr nutzen, konzentriert Kohlendioxid um das kohlenstofffixierende Enzym und kann bei knappem Kohlendioxid besser funktionieren. Der **Crassulaceen-Säurestoffwechsel (CAM)** trennt Kohlenstoffaufnahme und -nutzung zwischen Nacht und Tag und hilft vielen Pflanzen, Wasser zu sparen.
> Das sind Strategiefamilien mit vielen Unterschieden zwischen Arten, keine aufeinanderfolgenden Ränge „besserer“ Pflanzen. Die sehr niedrigen Kohlendioxidschwellen der Arbeit sind Annahmen zur Erkundung möglicher Grenzen, keine Garantie dafür, dass sich ein zukünftiges Ökosystem zu ihrer Nutzung entwickelt.

Warum 1,86 Milliarden Jahre kein Ablaufdatum sind

Die hervorgehobene Schätzung der Arbeit von etwa **1,86 Milliarden Jahren** ist der Mittelwert der beiden optimistischen oberen Endpunkte: 1,84 Milliarden Jahre im kohlendioxidbegrenzten Zweig und 1,87 Milliarden Jahre im hitzebegrenzten Zweig. Sie ist eine kompakte Zusammenfassung zweier verschiedener Szenarien. Sie ist kein drittes Modellergebnis mit höherer Genauigkeit und kein bestes

Schätzdatum.

Selbst die breitere Spanne von 1,35 bis 1,87 Milliarden Jahren trägt keine einheitliche Wahrscheinlichkeit. Ihr unterer und oberer Wert hängen von verschiedenen Verwitterungsannahmen, verschiedenen biologischen Schwellen und einer einzigen Klimamodellkonfiguration ab. Die Spannweite misst die Entscheidungen im Experiment ebenso sehr wie die Zeit.



Die Spanne von 1,35 bis 1,87 Milliarden Jahren entsteht erst nach der Wahl eines Verwitterungspfads, einer biologischen Schwelle und einer Modellgrenze. Sie ist eine Landkarte von Annahmen, keine Uhr bis zum Aussterben allen Lebens.

The Clean Paper CC BY 4.0

Andere Grenzen könnten früher erreicht werden

Die längsten Schätzungen für die vegetative Biosphäre nähern sich einer anderen unsicheren Grenze: einem feuchten oder außer Kontrolle geratenen Treibhauseffekt, der einen starken Verlust der Ozeane auslösen könnte. Klimamodelle unterscheiden sich erheblich darin, wann diese Zustände bei zunehmender Sonneneinstrahlung beginnen, besonders weit entfernt von heutigen Bedingungen. Einige Schätzungen setzen sie vor die optimistischste Photosynthesegrenze.

Der obere Zweig darf daher nicht als Versprechen gelesen werden, dass die Erde ihre Ozeane, vertrauten Kontinente oder bewohnbaren Oberflächenbedingungen bis in 1,87 Milliarden Jahre behält. Das Modell umfasst auch keine zukünftige Plattentektonik, keine Veränderungen der Landfläche, keine evolvierenden Ökosysteme und keinen vollständig dynamischen Ozean. Seine Berechnungen

dazu, wie die Atmosphäre Energie absorbiert und emittiert, werden außerdem in Bereiche intensiver Sonneneinstrahlung und extrem niedrigen Kohlendioxids geführt, in denen verschiedene Modelle auseinanderlaufen.

Evolutionäre Anpassung und technologische Eingriffe erscheinen in der Diskussion der Arbeit als Möglichkeiten. Sie sind keine Ergebnisse der 29 Klimasimulationen. Das Modell zeigt weder, dass zukünftige Organismen einen Photosyntheseweg für ein Teil pro Million entwickeln, noch dass eine Zivilisation die Atmosphäre eine Milliarde Jahre lang steuert.

Dies ist kein Ergebnis über die heutige Klimakrise

Die solare Aufhellung wirkt über Hunderte Millionen bis Milliarden Jahre. Die heutige, vom Menschen verursachte Erwärmung entsteht durch rasch zunehmende Treibhausgase über Jahrzehnte und Jahrhunderte. Das sind verschiedene Antriebe auf radikal verschiedenen Zeitskalen, die unterschiedliche Fragen beantworten.

Nichts in dieser Studie schwächt die Belege für den gegenwärtigen Klimawandel oder spricht dafür, Maßnahmen aufzuschieben. Eine Biosphäre, die in einem fernen Modellszenario vielleicht einen Teil des photosynthetischen Lebens erhält, ist nicht dasselbe wie ein Klima, in dem heutige Gesellschaften und Ökosysteme sicher bleiben.

Die Arbeit ist wertvoll, weil sie eine ferne Frage disziplinierter macht. Sie zeigt, dass frühere, einfachere Modelle bei zunehmender Sonneneinstrahlung und festgehaltenem Kohlendioxid möglicherweise zu stark erwärmten und dass photosynthetisches Leben mehr Wege zum Fortbestehen haben könnte, als eine einzige kanonische Kohlenstoffschwelle nahelegt. Sie zeigt auch, warum jeder zusätzliche Bruchteil einer Milliarde Jahre an eine Kette von Annahmen gebunden ist.

Die Sonne, die ein Blatt ernährt, verändert sich langsam. Ob die Erde weitere 1,35, 1,87 oder eine andere Zahl von Milliarden Jahren grün bleibt, hängt davon ab, wie Gesteine, Wasser, Atmosphäre und Leben gemeinsam reagieren. Das ehrliche Ergebnis ist kein Datum. Es ist ein weiterer Blick auf den Kompromiss.

Kurz zusammengefasst

Eine dreidimensionale Klimastudie fragt, wie lange die vegetative – photosynthetische – Biosphäre der Erde fortbestehen könnte, während die Sonne langsam heller wird. Die Forschenden berechneten 29 getrennte stationäre Klimata und verfolgten zwei illustrative Grenzfälle durch sie. Bei schwacher Verwitterung und auf 400 Teile pro Million festgehaltenem Kohlendioxid werden gewählte Hitzegrenzen für Landpflanzen in etwa 1,68 beziehungsweise 1,87 Milliarden Jahren erreicht. Bei starker Verwitterung und einer auf 288 Kelvin, etwa 15 Grad Celsius, festgehaltenen globalen Mitteltemperatur werden gewählte Kohlendioxidgrenzen für die Photosynthese in etwa 1,35, 1,64 und – unter Verwendung einer vorläufigen Schwelle – 1,84 Milliarden Jahren erreicht.

Die häufig zitierte Zahl von 1,86 Milliarden Jahren ist lediglich der gerundete Mittelwert der beiden optimistischen oberen Endpunkte. Dies sind szenarioabhängige Modellspannen, kein Datum, an dem Erde, Menschheit oder alles Leben enden. Das Modell verwendet vorgegebene Pfade, heutige Geografie, einen Schichtozean und keine explizite Boden-Vegetations- oder Klima-Verwitterungs-Kopplung; außerdem nähern sich die längsten Schätzungen unsicheren Grenzen von Treibhauseffekt und Ozeanverlust.

Nüchtern geprüft

Was die Arbeit zeigt: In dieser ExoCAM-Konfiguration erwärmen sich dreidimensionale Klimata bei zunehmender Sonneneinstrahlung und festem Kohlendioxid im Allgemeinen weniger als die zum Vergleich verwendeten vereinfachten Modelle. Über zwei vorgegebene Verwitterungsgrenzfälle und mehrere gewählte biologische Schwellen hinweg liegen die Grenzen für die vegetative Biosphäre ungefähr 1,35 bis 1,87 Milliarden Jahre in der Zukunft.

Was plausibel, aber nicht belegt ist: Dass einige CAM-Pflanzen oder Wasserpflanzen, die gelöstes Hydrogencarbonat nutzen, die Photosynthese bei ungefähr einem Teil pro Million atmosphärischem Kohlendioxid aufrechterhalten könnten; dass Anpassung oder Technologie photosynthetisches Leben weiter verlängern könnten; und dass der reale Klima-Verwitterungs-Pfad zwischen den beiden Modellgrenzfällen bleibt.

Was sie nicht zeigt: Ein festes Datum für das Ende aller Pflanzen, allen Lebens, der menschlichen Zivilisation, der Ozeane der Erde oder des Planeten; eine einzige kontinuierliche Simulation der nächsten zwei Milliarden Jahre; oder irgendeinen Grund, den heutigen menschengemachten Klimawandel geringzuschätzen.

Wichtigste Einschränkungen: Neunundzwanzig stationäre Fälle aus einer Klimamodellfamilie; vorgegebene statt dynamisch gekoppelte Verwitterungspfade; heutige Geografie; ein Schichtozean; festes Methan; Obliquität und Exzentrizität null; keine expliziten Böden, Vegetation oder Biosphärenrückkopplung; unsichere Hitze- und Kohlendioxidschwellen; und große Modellunterschiede nahe feuchten und außer Kontrolle geratenen Treibhausbedingungen.

Wie viel Vertrauen sollte ein allgemeines Publikum haben? Hohes Vertrauen darin, dass die Studie die plausible Modellspanne erweitert und die sie bestimmenden Annahmen sichtbar macht. Mittleres Vertrauen in die numerische Spannweite als nützliche Klammer innerhalb dieses Modells. Geringes Vertrauen in ein exaktes Datum, weil die entferntesten Endpunkte von bewusst extremen Klimapfaden und unsicherer Biologie abhängen.

Quellen

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere, Journal of Geophysical Research: Atmospheres 131, e2025JD045586 (2026)
https://doi.org/10.1029/2025JD045586

Haqq-Misra & Wolf, Maximum Lifetime of the Vegetative Biosphere: Model Data, Zenodo record 16584870
https://doi.org/10.5281/zenodo.16584870