The Clean Paper

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

Hvor længe kan Jorden forblive grøn? En klimamodel giver intervaller, ikke en dommedagsdato

Niogtyve tredimensionale klimasimuleringer placerer forskellige grænser for Jordens fotosyntetiske biosfære mellem omtrent 1,35 og 1,87 milliarder år ude i fremtiden. Værdierne afhænger af bevidst forenklede forløb for bjergartsforvitring, varme og de laveste kuldioxidniveauer, som planter muligvis kan bruge. De forudsiger ikke, hvornår alle planter, alt liv, civilisationen eller planeten ophører.

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

Hvor længe kan Jorden forblive grøn? En klimamodel giver intervaller, ikke en dommedagsdato

Et blad lever inden for en snæver balance. Det har brug for lys, vand, kuldioxid og en temperatur, som kemien i bladet kan tåle. Over et menneskeliv virker Solen som den uforanderlige del af denne balance. Over en milliard år er den det ikke.

Efterhånden som Solen ældes på hovedserien, bliver den langsomt mere lysstærk. Mere sollys opvarmer Jorden, men planeten har en langsigtet reaktion: Reaktioner mellem regnvand, kuldioxid og silikatbjergarter kan fjerne kuldioxid fra atmosfæren. Det svækker drivhuseffekten og modvirker noget af opvarmningen. Den samme reaktion, som køler planeten, kan til sidst fratage fotosyntetiske organismer det kulstof, de bruger til at opbygge levende væv.

En ny artikel i Journal of Geophysical Research: Atmospheres spørger, hvilken grænse der kan komme først: for meget varme eller for lidt kuldioxid. Svaret er ikke en dato for, hvornår Jorden dør. Langs to bevidst forenklede fremtidsbaner ligger de valgte grænser for fotosyntetisk liv omtrent **1,35 til 1,87 milliarder år ude i fremtiden**.

Dette interval gælder den **vegetative biosfære**: den del af Jordens levende system, som opretholdes af fotosyntetiske organismer, især planter og andet liv, der omdanner lys og kuldioxid til biologisk materiale. Det er ikke en prognose for alle mikrober. Det er ikke den menneskelige civilisations levetid. Det er ikke planetens levetid.

Den planetariske termostat har to usikre indstillinger

Den centrale usikkerhed er **silikatforvitring**. Kuldioxid opløses i regnvand, reagerer med silikatbjergarter og transporteres med tiden mod havet og sedimenterne. Vulkaner fører kuldioxid tilbage over geologisk tid. Tilsammen er disse processer en del af karbonat-silikat-kredsløbet, som ofte beskrives som en planetarisk termostat.

I en varmere og vådere verden kan forvitringen gå hurtigere og fjerne kuldioxid mere effektivt. Men forskerne ved ikke, hvor stærkt denne reaktion vil styre Jorden under en mere lysstærk fremtidig Sol. Jacob Haqq-Misra og Eric Wolf valgte derfor ikke én angiveligt rigtig udviklingsbane. De modellerede to **ydertilfælde**: bevidst ekstreme tilfælde, der afgrænser usikkerheden.

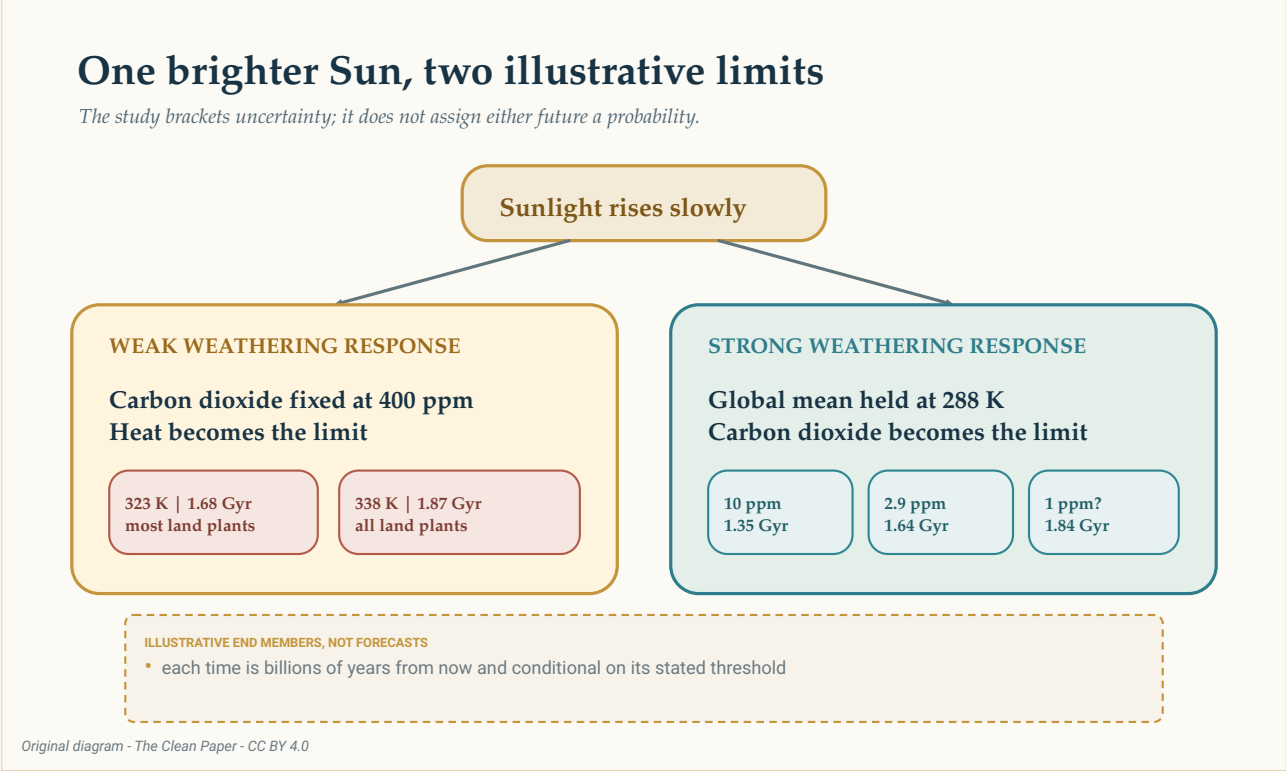
- I ydertilfældet med **svag forvitring** forbliver atmosfærisk kuldioxid på 400 dele pr. million, mens den stadig mere lysstærke Sol hæver temperaturen.
- I ydertilfældet med **stærk forvitring** forbliver den globale middeltemperatur ved overfladen på 288 kelvin, omtrent 15 grader celsius, mens kuldioxid trækkes ned, efterhånden som solindstrålingen stiger.

Ingen af grenene præsenteres som Jordens faktiske fremtid. Den første spørger, hvad varmen ville gøre, hvis kuldioxid forblev høj. Den anden spørger, hvad kulstofmangel ville gøre, hvis forvitringen

holdt den globale temperatur tæt på nutidens middelværdi.

Hvordan kan forvitring fungere som en termostat?

Analogien handler om tilbagekobling, ikke om en bogstavelig reguleringsknap. Når et varmere klima fremskynder kemisk forvitring, kan mere atmosfærisk kuldioxid ende i opløste stoffer, mineraler og sedimenter. Når denne drivhusgas fjernes, modvirkes noget af den oprindelige opvarmning. Over meget lange tidsrum fører vulkansk afgasning kuldioxid tilbage.
Styrken i hvert led afhænger af nedbør, blottet grundfjeld, erosion, biologi, tektonik og havkemi. Derfor afprøver artiklen begrænsende reaktioner i stedet for at behandle termostaten som en kendt maskine.



Artiklen afgrænser en usikker fremtid med to illustrative ydertilfælde. Hvis forvitringen reagerer svagt, når den stigende varme de valgte tærskler for landplanter. Hvis den reagerer stærkt, når den faldende kuldioxid de valgte tærskler for fotosyntese. Dette er betingede modelgrene, ikke sandsynligheder eller nedtællingsdatoer.

The Clean Paper CC BY 4.0

Niogtyve stabiliserede modelverdener, ikke én to milliarder år lang film

Forskerne brugte ExoCAM, en tredimensional global klimamodel, til at beregne **29 stationære klimaer** på tværs af kombinationer af stærkere solindstråling og lavere kuldioxid. Hvert tilfælde blev kørt i 70 modelår. Her er ét modelår én simuleret årscyklus under faste betingelser: Det er køretid, som lader det kunstige klima stabilisere sig, ikke ét trin i en år-for-år-prognose for Jordens fremtid. De sidste 20 år blev gennemsnitsberegnet, efter at det simulerede klima havde haft tid til at stabilisere sig.

De 29 tilfælde er separate modelverdener. Hver kørsel er ét punkt i et gitter og besvarer spørgsmålet: »Hvilket stabiliseret klima passer til dette valgte par af solindstråling og kuldioxid?« Computeren begyndte ikke med nutidens Jord og lod atmosfæren, bjergarterne, havene og livet udvikle sig kontinuerligt gennem de næste to milliarder år. Forfatterne fulgte i stedet de to skematiske forvitringsbaner gennem de på forhånd beregnede punkter; selve banen mellem punkterne blev ikke simuleret.

Tabellen gengiver kombinationerne af solindstråling og kuldioxid i det officielle arkiv med modeldata. Tilfælde-ID'erne er læsehjælp tilføjet her i arkivets rækkefølge. **S/S0** er den relative solarkonstant: den indkommende solenergi, der bruges i modellen, divideret med nutidens værdi, S0. En værdi på 1,2 betyder således 20 procent mere indkommende solenergi end i dag. **CO2 (ppm)** er blandingsforholdet for atmosfærisk kuldioxid, målt i molekyler pr. million atmosfæremolekyler.

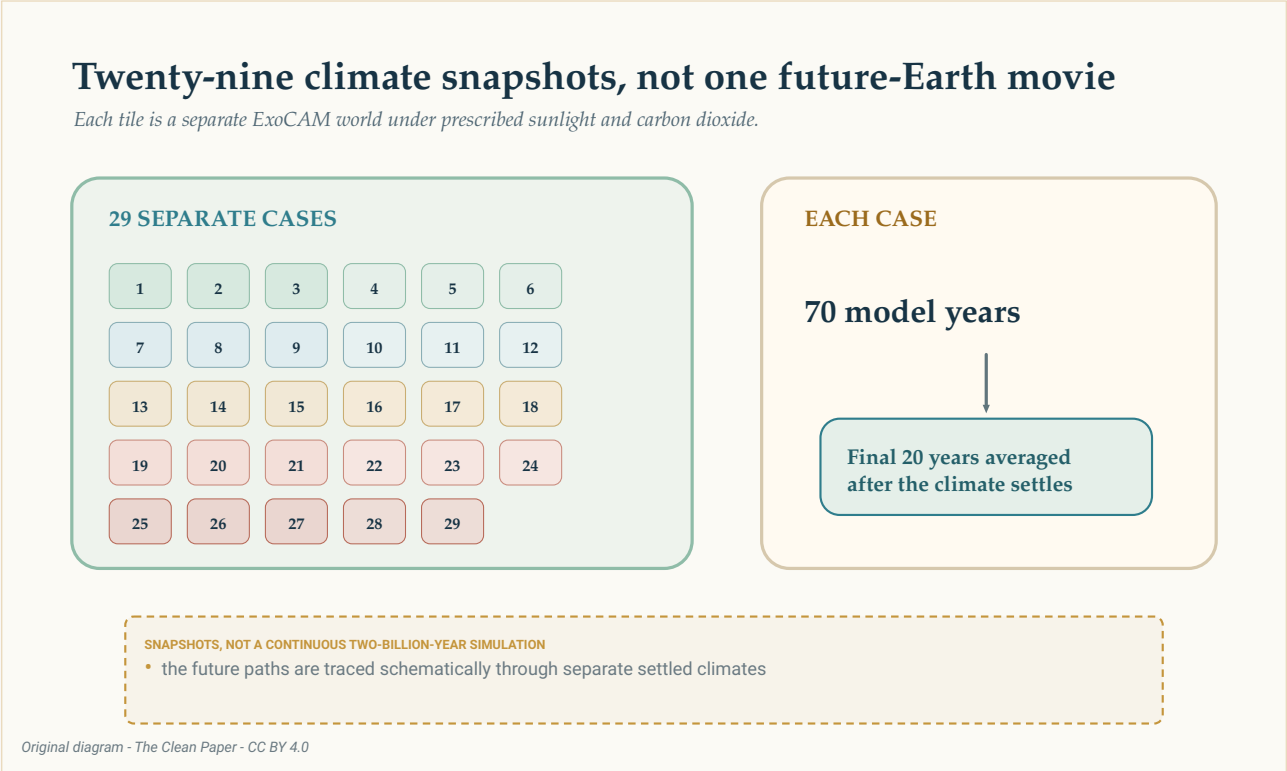
Tilfælde-ID	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180
21	1.143	11.25

Tilfælde-ID	S/S0	CO2 (ppm)
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

Modeljorden er genkendelig, men bevidst begrænset. Den har Jordens størrelse og nutidens geografi. Den har et forenklet laghav i stedet for et hav med fuld cirkulation, atmosfæretryk sat til omtrent nutidens jordværdi (én bar) og et fast metanindhold. Banen er perfekt cirkulær (nul excentricitet), og rotationsaksen har ingen hældning (nul aksehældning). Modellen indeholder ikke eksplicit jordbund, vegetation eller tilbagekobling fra en biosfære i forandring. Vigtigst af alt er klimamodellen ikke dynamisk koblet til en model for bjergartsforvitring. ExoCAM beregner med andre ord ikke forvitring, bruger den til at opdatere kuldioxid og kører derefter det næste klima i en tilbagekoblingssløjfe. Forskerne foreskrev i stedet de to begrænsende baner og fulgte dem gennem gitteret af 29 klimakørsler.

Hvad betyder »stationær tilstand« i en klimamodel?

Et tilfælde i stationær tilstand er et modelklima, der får lov til at stabilisere sig under én valgt Sol og atmosfære. Vejret varierer stadig fra dag til dag og år til år i simuleringen, men langtidsmidlerne holder op med at drive kraftigt.
Det er nyttigt til at spørge: »Hvilket klima passer til disse betingelser?« Det er noget andet end at forudsige den præcise rute, den virkelige Jord følger fra ét sæt betingelser til det næste.



Hver rude er en separat ExoCAM-klimakørsel på 70 modelår, hvor de sidste 20 år er gennemsnitsberegnet. Studiet undersøgte 29 stabiliserede klimaer under foreskrevne betingelser for solindstråling og kuldioxid; det simulerede ikke én Jord, der udviklede sig kontinuerligt gennem to milliarder år.

The Clean Paper CC BY 4.0

Ydertilfælde ét: nok kuldioxid, for meget varme

I grenen med svag forvitring forbliver kuldioxid fast på 400 dele pr. million. Når solindstrålingen stiger, bliver varme den begrænsende faktor.

Artiklen bruger to tærskler for global middeltemperatur hentet fra tidligere arbejde:

- Ved **323 kelvin**, omtrent **50 grader celsius** som globalt årsgennemsnit, behandles verden som for varm for de fleste landplanter. Modellen når denne tærskel om omtrent **1,68 milliarder år**.
- Ved **338 kelvin**, omtrent **65 grader celsius** som globalt årsgennemsnit, behandles verden som for varm for alle landplanter. Modellen når denne tærskel om omtrent **1,87 milliarder år**.

Det er valgte biologiske grænser, ikke universelle temperaturer, hvor alle fotosyntetiske organismer nødvendigvis svigter. Et globalt gennemsnit skjuler også store regionale forskelle. Studiet undersøger særskilt, hvor kombinationer af temperatur og vand kan forblive egnede, men en etiket på et klimakort kan ikke kortlægge alle fremtidige tilflugtssteder eller tilpasninger.

Ydertilfælde to: tålelig temperatur, for lidt kuldioxid

I grenen med stærk forvitring holdes den globale middeltemperatur på 288 kelvin, omtrent 15 grader celsius, mens atmosfærisk kuldioxid falder. Her afhænger svaret af, hvor lidt kulstof forskellige fotosynteseveje kan bruge.

- Ved den traditionelle tærskel på **10 dele pr. million** — 10 kuldioxidmolekyler for hver million atmosfæremolekyler — nås grænsen for C4-fotosyntese om omtrent **1,35 milliarder år**. C4-fotosyntese bruges blandt andet af majs og sukkerrør og koncentrerer kuldioxid omkring det enzym, der binder kulstoffet.
- En alternativ C4-tærskel på **2,9 dele pr. million**, diskuteret i tidligere arbejde, flytter grænsen til omtrent **1,64 milliarder år**.
- En foreløbig tærskel på **1 del pr. million**, knyttet til mulig overlevelse hos visse CAM-planter — planter, der bruger crassulacean-syremetabolisme, hvor optagelse af kuldioxid om natten adskilles fra brugen om dagen — eller vandplanter, som kan bruge opløst bikarbonat, flytter grænsen til omtrent **1,84 milliarder år**.

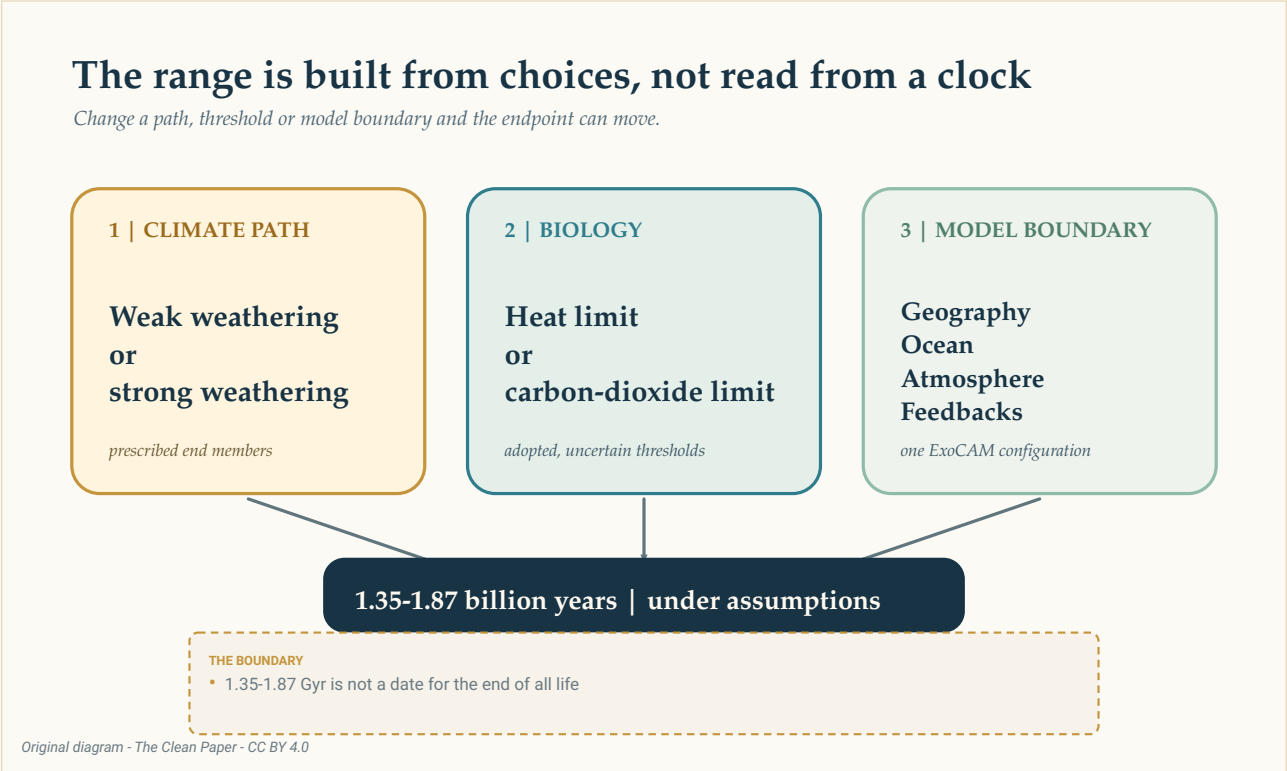
Det sidste tal har det største biologiske forbehold. Forfatterne kalder udtrykkeligt grænsen på én del pr. million foreløbig. Den er ikke en eksperimentelt fastslået overlevelsestærskel for alle CAM-planter eller al vandvegetation under fremtidige jordforhold.

> **C3, C4 og CAM er strategier, ikke en rangstige**
>
> Planter bruger forskellige biokemiske veje til at indfange kulstof. **C3-fotosyntese** er den mest almindelige. **C4-fotosyntese**, som blandt andet bruges af majs og sukkerrør, koncentrerer kuldioxid omkring det enzym, der binder kulstof, og kan fungere bedre, når der er lidt kuldioxid. **Crassulacean-syremetabolisme (CAM)** adskiller optagelse og brug af kulstof mellem nat og dag, hvilket hjælper mange planter med at spare vand.
> Det er familier af strategier med mange forskelle mellem arter, ikke successive niveauer af »bedre« planter. Artiklens meget lave kuldioxidtærskler er antagelser, der bruges til at udforske mulige grænser, ikke garantier for, at et fremtidigt økosystem vil udvikle sig til at bruge dem.

Hvorfor 1,86 milliarder år ikke er en udløbsdato

Artiklens hovedskøn på omtrent **1,86 milliarder år** er gennemsnittet af de to optimistiske øvre endepunkter: 1,84 milliarder år i den kuldioxidbegrænsede gren og 1,87 milliarder år i den varmebegrænsede gren. Det er en kompakt opsummering af to forskellige scenarier. Det er ikke et tredje modelresultat med større præcision, og det er ikke en dato for det bedste skøn.

Selv det bredere interval på 1,35 til 1,87 milliarder år har ikke én fælles sandsynlighed. Den nedre og øvre værdi afhænger af forskellige antagelser om forvitring, forskellige biologiske tærskler og én klimamodelkonfiguration. Intervallet måler valgene i forsøget lige så meget, som det måler tid.



Intervallet på 1,35 til 1,87 milliarder år opstår først, efter at man har valgt en forvitringsbane, en biologisk tærskel og en modelgrænse. Det er et kort over antagelser, ikke et ur, der ender med udryddelse af alt liv.

The Clean Paper CC BY 4.0

Andre grænser kan komme først

De længste skøn for den vegetative biosfære nærmer sig en anden usikker grænse: et fugtigt eller løbsk drivhus, der kan føre til omfattende tab af havvand. Klimamodeller er meget uenige om, hvornår sådanne tilstande begynder under stigende solindstråling, især langt fra nutidens forhold. Nogle skøn placerer dem før den mest optimistiske fotosyntesegrænse.

Det betyder, at den øvre gren ikke kan læses som et løfte om, at Jorden vil bevare havene, de kendte kontinenter eller beboelige overfladeforhold frem til 1,87 milliarder år fra nu. Modellen omfatter heller ikke fremtidig pladetektonik, ændringer i landareal, økosystemer i udvikling eller et fuldt dynamisk hav. Beregningerne af, hvordan atmosfæren absorberer og udsender energi, presses også ind i regimer med intens solindstråling og ekstremt lidt kuldioxid, hvor forskellige modeller divergerer.

Evolutionær tilpasning og teknologisk indgriben nævnes som muligheder i artiklens diskussion. De er ikke resultater fra de 29 klimasimuleringer. Modellen viser ikke fremtidige organismer, der udvikler en fotosyntesevej ved én del pr. million, og den viser ikke en civilisation, der styrer atmosfæren i en milliard år.

Dette er ikke et resultat om nutidens klimakrise

Solens stigende lysstyrke virker over hundreder af millioner til milliarder af år. Nutidens menneskeskabte opvarmning skyldes hurtigt stigende drivhusgasser over årtier og århundreder. Det er forskellige drivkræfter på radikalt forskellige tidsskalaer, som besvarer forskellige spørgsmål.

Intet i dette studie svækker dokumentationen for nutidens klimaændringer eller taler for at udsætte handling. En biosfære, som måske bevarer noget fotosyntetisk liv under ét fjernt modelscenario, er ikke det samme som et klima, hvor nutidens samfund og økosystemer er sikre.

Artiklen er værdifuld, fordi den gør et fjernt spørgsmål mere disciplineret. Den viser, at tidligere, simplere modeller kan have givet for meget opvarmning, når solindstrålingen steg, mens kuldioxid blev holdt fast, og at fotosyntetisk liv kan have flere veje til at bestå, end én kanonisk kulstofgrænse antyder. Den viser også, hvorfor hver ekstra brøkdel af en milliard år er knyttet til en kæde af antagelser.

Solen, der nærer et blad, forandrer sig langsomt. Om Jorden forbliver grøn i yderligere 1,35, 1,87 eller et andet antal milliarder år, vil afhænge af, at bjergarter, vand, atmosfære og liv reagerer sammen. Det ærlige resultat er ikke en dato. Det er et bredere syn på balancen.

Kort fortalt

Et tredimensionalt klimastudie spørger, hvor længe Jordens vegetative — fotosyntetiske — biosfære kan bestå, mens Solen langsomt bliver mere lysstærk. Forskerne beregnede 29 separate klimaer i stationær tilstand og fulgte to illustrative ydertilfælde gennem dem. Med svag forvitring og kuldioxid fast på 400 dele pr. million nås de valgte varmegrænser for landplanter om omtrent 1,68 og 1,87 milliarder år. Med stærk forvitring og den globale middeltemperatur fast på 288 kelvin, omtrent 15 grader celsius, nås de valgte kuldioxidgrænser for fotosyntese om omtrent 1,35, 1,64 og — ved brug af en foreløbig tærskel — 1,84 milliarder år. De ofte citerede 1,86 milliarder år er blot det afrundede gennemsnit af de to optimistiske øvre endepunkter. Det er scenarieafhængige modelintervaller, ikke en dato for, hvornår Jorden, menneskeheden eller alt liv ophører. Modellen bruger foreskrevne baner, nutidens geografi, et laghav og ingen eksplicit kobling mellem jordbund og vegetation eller mellem klima og forvitring, og de længste skøn nærmer sig usikre grænser for drivhus og tab af hav.

Nøgtern vurdering

Det viser artiklen: I denne ExoCAM-konfiguration opvarmes tredimensionale klimaer generelt mindre under stigende solindstråling og fast kuldioxid end de forenklede modeller, der bruges til sammenligning. På tværs af to foreskrevne ydertilfælde for forvitring og flere valgte biologiske tærskler ligger grænserne for den vegetative biosfære omtrent 1,35 til 1,87 milliarder år ude i fremtiden.

Det er plausibelt, men ikke fastslået: At visse CAM-planter eller vandplanter, der bruger opløst

bikarbonat, kan opretholde fotosyntese nær én del pr. million atmosfærisk kuldioxid; at tilpasning eller teknologi kan forlænge fotosyntetisk liv yderligere; og at den virkelige klima- og forvitringsbane vil forblive mellem modellens to ydertilfælde.

Det viser den ikke: En fast dato for afslutningen på alle planter, alt liv, menneskelig civilisation, Jordens oceaner eller planeten; én kontinuerlig simulering af de næste to milliarder år; eller nogen grund til at nedtone nutidens menneskeskabte klimaændringer.

Vigtigste begrænsninger: Niogtyve tilfælde i stationær tilstand fra én klimamodelfamilie; foreskrevne frem for dynamisk koblede forvitringsbaner; nutidens geografi; et laghav; fast metan; nul aksehældning og excentricitet; ingen eksplicit jordbund, vegetation eller tilbagekobling fra biosfæren; usikre tærskler for varme og kuldioxid; og stor uenighed mellem modeller nær fugtige og løbske drivhustilstande.

Hvor stor tillid bør en almindelig læser have? Høj tillid til, at studiet udvider det plausible modelinterval og identificerer de antagelser, der styrer det. Moderat tillid til det numeriske spænd som en nyttig afgrænsning inden for denne model. Lav tillid til en nøjagtig dato, fordi de fjerneste endepunkter afhænger af bevidst ekstreme klimabaner og usikker biologi.

Kilder

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