The Clean Paper

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

Hvor lenge kan jorden forbli grønn? En klimamodell gir intervaller, ikke en dommedagsdato

Tjue-ni tredimensjonale klimasimuleringer plasserer ulike grenser for jordens fotosyntetiske biosfære omtrent 1,35 til 1,87 milliarder år frem i tid. Verdiene avhenger av bevisst forenklede baner for bergartsforvitring, varme og de laveste karbondioksidnivåene planter kan tenkes å bruke. De forutsier ikke når alle planter, alt liv, sivilisasjonen eller planeten tar slutt.

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 lenge kan jorden forbli grønn? En klimamodell gir intervaller, ikke en dommedagsdato

Et blad lever innenfor en trang balanse. Det trenger lys, vann, karbondioksid og en temperatur som kjemien i bladet tåler. Over et menneskeliv virker solen som den uforanderlige delen av denne balansen. Over en milliard år er den ikke det.

Etter hvert som solen eldes på hovedserien, blir den langsomt mer lyssterk. Mer sollys varmer jorden, men planeten har en langsiktig respons: reaksjoner mellom regnvann, karbondioksid og silikatbergarter kan fjerne karbondioksid fra atmosfæren. Det svekker drivhuseffekten og motvirker noe av oppvarmingen. Den samme responsen som kjøler planeten, kan til slutt frata fotosyntetiske organismer karbonet de bruker til å bygge levende vev.

En ny artikkel i Journal of Geophysical Research: Atmospheres spør hvilken grense som kan komme først: for mye varme eller for lite karbondioksid. Svaret er ikke en dato for når jorden dør. Langs to bevisst forenklede fremtidsbaner ligger de valgte grensene for fotosyntetisk liv omtrent **1,35 til 1,87 milliarder år frem i tid**.

Dette intervallet gjelder den **vegetative biosfæren**: den delen av jordens levende system som opprettholdes av fotosyntetiske organismer, særlig planter og annet liv som omdanner lys og karbondioksid til biologisk materiale. Det er ikke en prognose for alle mikrober. Det er ikke levetiden til menneskelig sivilisasjon. Det er ikke levetiden til planeten.

Den planetære termostaten har to usikre innstillinger

Den sentrale usikkerheten er **silikatforvitring**. Karbondioksid løses i regnvann, reagerer med silikatbergarter og transporteres etter hvert mot hav og sedimenter. Vulkaner fører karbondioksid tilbake over geologisk tid. Sammen er disse prosessene en del av karbonat–silikat-syklusen, som ofte beskrives som en planetær termostat.

I en varmere og våtere verden kan forvitringen gå raskere og fjerne karbondioksid mer effektivt. Men forskerne vet ikke hvor sterkt denne responsen vil styre jorden under en mer lyssterk fremtidig sol. Jacob Haqq-Misra og Eric Wolf valgte derfor ikke én angivelig riktig utviklingsbane. De modellerte to **yttertilfeller**: bevisst ekstreme tilfeller som avgrenser usikkerheten.

- I yttertilfellet med **svak forvitring** forblir atmosfærisk karbondioksid på 400 deler per million, mens den stadig mer lyssterke solen øker temperaturen.
- I yttertilfellet med **sterk forvitring** forblir den globale middeltemperaturen ved overflaten på 288 kelvin, omtrent 15 grader celsius, mens karbondioksid trekkes ned etter hvert som solinnstrålingen øker.

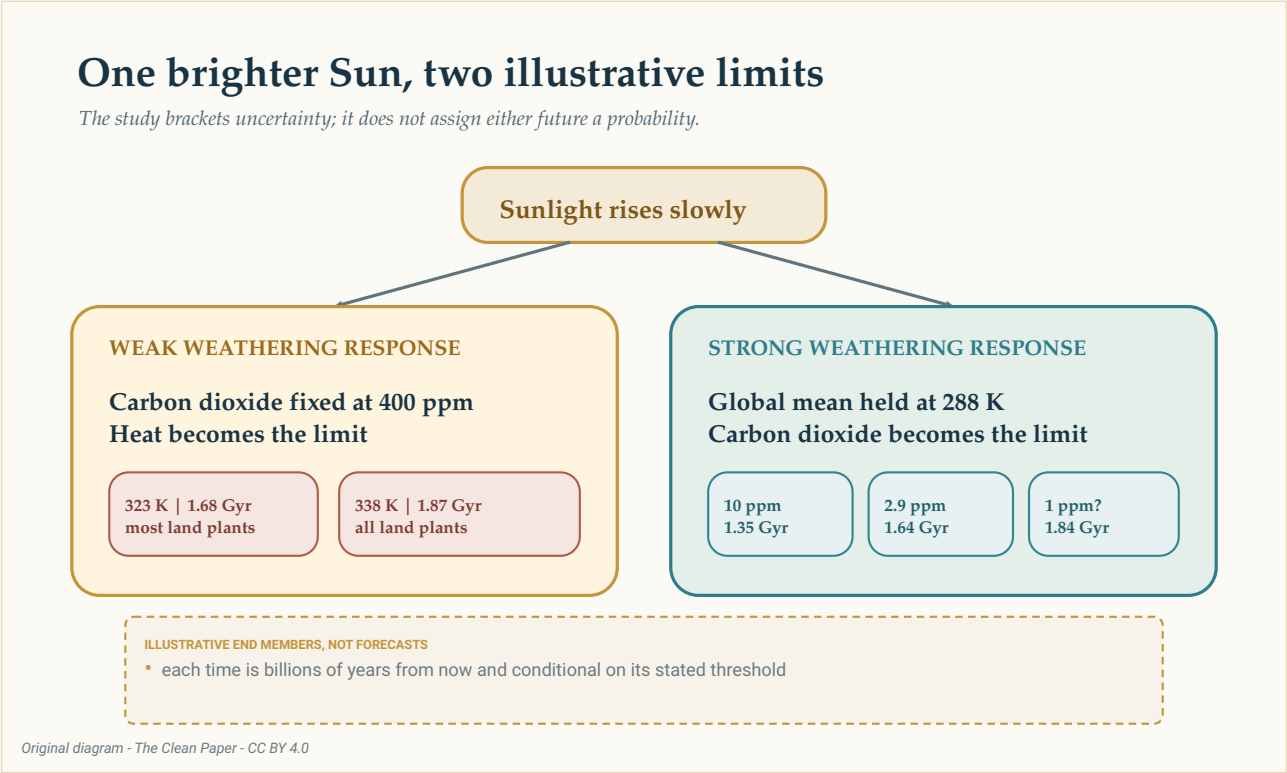
Ingen av grenene presenteres som jordens faktiske fremtid. Den første spør hva varmen ville gjøre dersom karbondioksidet forble høyt. Den andre spør hva karbonmangel ville gjøre dersom forvitrin-

gen holdt den globale temperaturen nær dagens middelverdi.

Hvordan kan forvitring fungere som en termostat?

Analogien handler om tilbakekobling, ikke om en bokstavelig reguleringsknapp. Når et varmere klima fremskynder kjemisk forvitring, kan mer atmosfærisk karbondioksid ende opp i oppløste stoffer, mineraler og sedimenter. Når denne drivhusgassen fjernes, motvirkes noe av den opprinnelige oppvarmingen. Over svært lange tidsskalaer fører vulkansk utgassing karbondioksid tilbake.

Styrken i hvert ledd avhenger av nedbør, blottlagt berggrunn, erosjon, biologi, tektonikk og havkjemi. Derfor tester artikkelen begrensende responser i stedet for å behandle termostaten som en kjent maskin.



Artikkelen avgrenser en usikker fremtid med to illustrative yttertilfeller. Hvis forvitringen reagerer svakt, når den økende varmen valgte terskler for landplanter. Hvis den reagerer sterkt, når det fallende karbondioksidet valgte terskler for fotosyntese. Dette er betingede modellgrener, ikke sannsynligheter eller nedtellingsdatoer.

The Clean Paper CC BY 4.0

Tjue-ni stabiliserte modellverdener, ikke én to milliarder år lang film

Forskerne brukte ExoCAM, en tredimensjonal global klimamodell, til å beregne **29 stasjonære klimaer** på tvers av kombinasjoner av sterkere solinnstråling og lavere karbondioksid. Hvert tilfelle ble kjørt i 70 modellår. Her er ett modellår én simulert årssyklus under faste betingelser: det er kjøretid som lar det kunstige klimaet stabilisere seg, ikke ett trinn i en år-for-år-prognose for jordens fremtid. De siste 20 årene ble gjennomsnittsberegnet etter at det simulerte klimaet hadde fått tid til å stabilisere seg.

Disse 29 tilfellene er separate modellverdener. Hver kjøring er ett punkt i et rutenett og svarer på spørsmålet: «Hvilket stabilisert klima passer til dette valgte paret av solinnstråling og karbondioksid?» Datamaskinen startet ikke med dagens jord og lot atmosfæren, bergartene, havene og livet utvikle seg kontinuerlig gjennom de neste to milliarder årene. Forfatterne fulgte i stedet de to skjematiske forvitringsbanene gjennom de forhåndsberegnede punktene; selve banen mellom punktene ble ikke simulert.

Tabellen gjengir kombinasjonene av solinnstråling og karbondioksid i det offisielle arkivet med modelldata. Tilfelle-ID-ene er lesehjelpemidler lagt til her i arkivets rekkefølge. **S/S0** er den relative solarkonstanten: den innkommende solenergien som brukes i modellen, delt på dagens verdi, S0. En verdi på 1,2 betyr dermed 20 prosent mer innkommende solenergi enn i dag. **CO2 (ppm)** er blandingsforholdet for atmosfærisk karbondioksid, målt i molekyler per million atmosfæremolekyler.

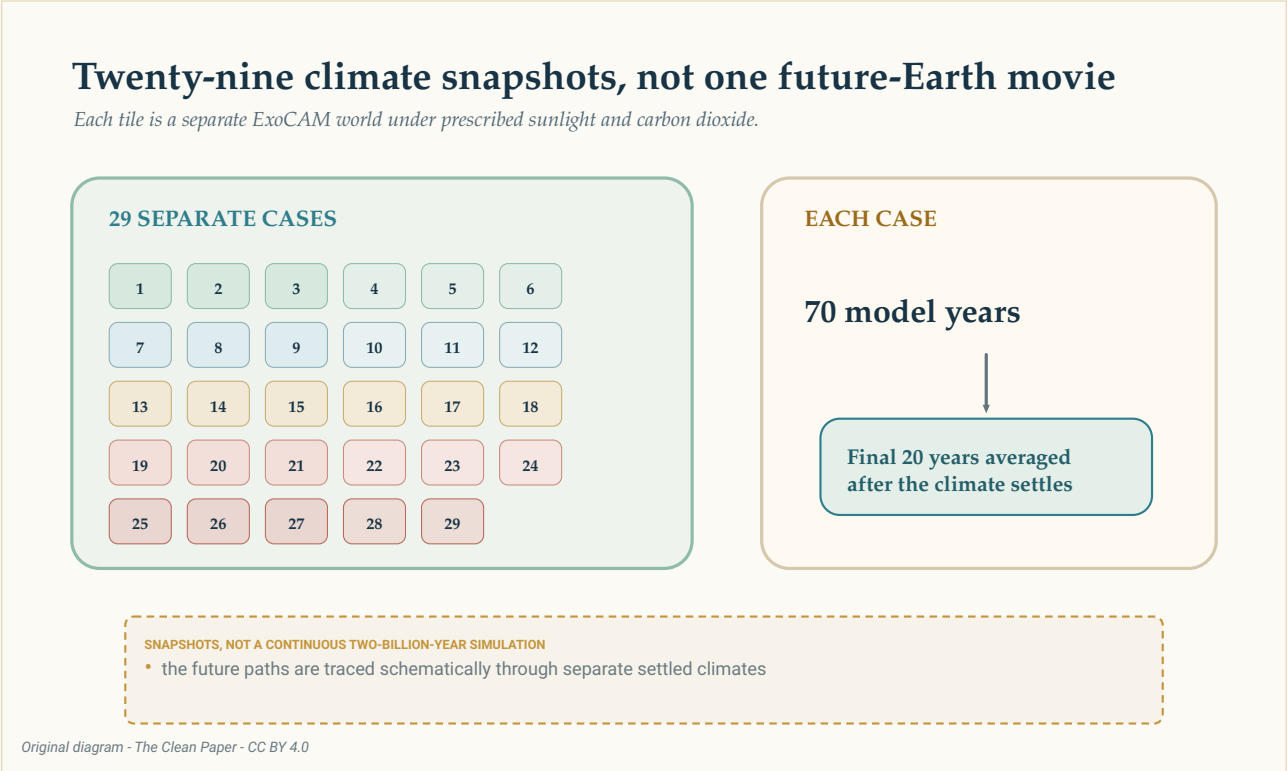
Tilfelle-ID	S/S0	CO2 (ppm)
1	1.0	400
2	1.0	180
3	1.0	11.25
4	1.0	1.40625
5	1.044	400
6	1.044	180
7	1.044	135
8	1.044	11.25
9	1.044	1.40625
10	1.081	400
11	1.081	180
12	1.081	11.25
13	1.081	1.40625
14	1.091	400
15	1.091	180
16	1.091	34
17	1.091	11.25
18	1.091	1.40625
19	1.143	400
20	1.143	180

Tilfelle-ID	S/S0	CO2 (ppm)
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

Modelljorden er gjenkjennelig, men med vilje begrenset. Den har jordens størrelse og dagens geografi. Den har et forenklet sjikthav i stedet for et hav med full sirkulasjon, atmosfæretrykk satt til omtrent dagens jordverdi (én bar) og fast metaninnhold. Banen er perfekt sirkulær (null eksentrisitet), og rotasjonsaksen har ingen helning (null aksehelning). Modellen inneholder ikke eksplisitt jordbunn, vegetasjon eller tilbakekobling fra en biosfære i endring. Viktigst av alt er klimamodellen ikke dynamisk koblet til en modell for bergartsforvitring. ExoCAM beregner med andre ord ikke forvitring, bruker den til å oppdatere karbondioksid og kjører deretter neste klima i en tilbakekoblingssløyfe. Forskerne foreskrev i stedet de to begrensende banene og fulgte dem gjennom rutenettet av 29 klimakjøringer.

Hva betyr «stasjonær tilstand» i en klimamodell?

Et tilfelle i stasjonær tilstand er et modellklima som får stabilisere seg under én valgt sol og atmosfære. Været varierer fortsatt fra dag til dag og år til år i simuleringen, men langtidsmidlene slutter å drive kraftig.
Dette er nyttig for å spørre «hvilket klima passer til disse betingelsene?» Det er noe annet enn å forutsi den nøyaktige ruten den virkelige jorden følger fra ett sett med betingelser til det neste.



Hver rute er en separat ExoCAM-klimakjøring på 70 modellår, der de siste 20 årene er gjennomsnittsberegnet. Studien undersøkte 29 stabiliserte klimaer under foreskrevne betingelser for solinnstråling og karbondioksid; den simulerte ikke én jord som utviklet seg kontinuerlig i to milliarder år.

The Clean Paper CC BY 4.0

Yttertilfelle én: nok karbondioksid, for mye varme

I grenen med svak forvitring forblir karbondioksid fast på 400 deler per million. Når solinnstrålingen øker, blir varme den begrensende faktoren.

Artikkelen bruker to terskler for global middeltemperatur hentet fra tidligere arbeid:

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

Dette er valgte biologiske grenser, ikke universelle temperaturer der alle fotosyntetiske organismer nødvendigvis svikter. Et globalt gjennomsnitt skjuler også store regionale forskjeller. Studien undersøker separat hvor kombinasjoner av temperatur og vann kan forbli egnede, men en etikett på et klimakart kan ikke katalogisere alle fremtidige tilfluktssteder eller tilpasninger.

Yttertilfelle to: tålelig temperatur, for lite karbondioksid

I grenen med sterk forvitring holdes den globale middeltemperaturen på 288 kelvin, omtrent 15 grader celsius, mens atmosfærisk karbondioksid faller. Her avhenger svaret av hvor lite karbon ulike fotosynteseveier kan bruke.

- Ved den tradisjonelle terskelen på **10 deler per million** – 10 karbondioksidmolekyler for hver million atmosfæremolekyler – nås grensen for C4-fotosyntese om omtrent **1,35 milliarder år**. C4-fotosyntese brukes av blant annet mais og sukkerrør og konsentrerer karbondioksid rundt enzymet som binder karbonet.
- En alternativ C4-terskel på **2,9 deler per million**, diskutert i tidligere arbeid, flytter grensen til omtrent **1,64 milliarder år**.
- En foreløpig terskel på **1 del per million**, knyttet til mulig overlevelse hos enkelte CAM-planter – planter som bruker crassulacean-syremetabolisme, der opptak av karbondioksid om natten skilles fra bruken på dagtid – eller vannplanter som kan bruke oppløst bikarbonat, flytter grensen til omtrent **1,84 milliarder år**.

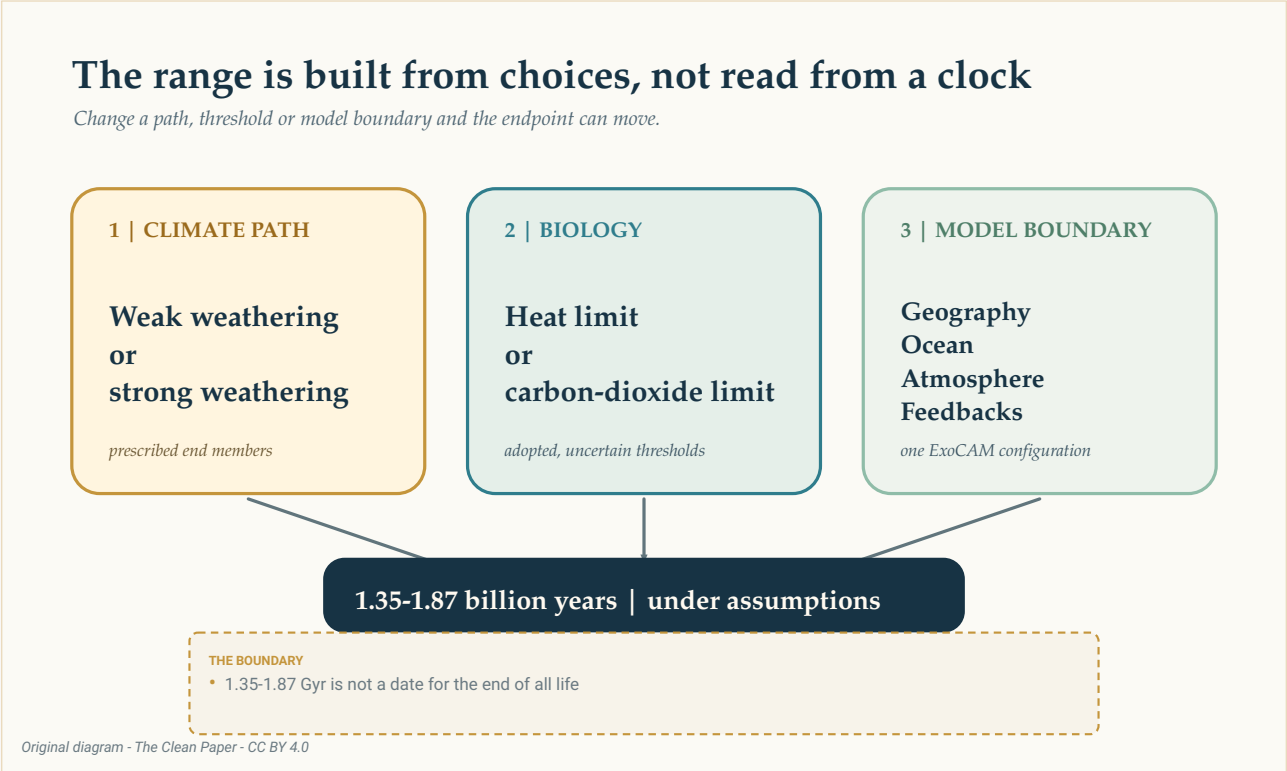
Det siste tallet har det største biologiske forbeholdet. Forfatterne kaller uttrykkelig grensen på én del per million foreløpig. Den er ikke en eksperimentelt fastslått overlevelsesterskel for alle CAM-planter eller all vannvegetasjon under fremtidige jordbetingelser.

> **C3, C4 og CAM er strategier, ikke en rangstige**
>
> Planter bruker ulike biokjemiske veier for å fange karbon. **C3-fotosyntese** er den vanligste. **C4-fotosyntese**, som brukes av blant annet mais og sukkerrør, konsentrerer karbondioksid rundt enzymet som binder karbon og kan fungere bedre når det er lite karbondioksid. **Crassulacean-syremetabolisme (CAM)** skiller opptak og bruk av karbon mellom natt og dag, noe som hjelper mange planter med å spare vann.
> Dette er familier av strategier med mange forskjeller mellom arter, ikke påfølgende nivåer av «bedre» planter. Artikkelens svært lave terskler for karbondioksid er antakelser som brukes til å utforske mulige grenser, ikke garantier for at et fremtidig økosystem vil utvikle seg til å bruke dem.

Hvorfor 1,86 milliarder år ikke er en utløpsdato

Artikkelens hovedanslag på omtrent **1,86 milliarder år** er gjennomsnittet av de to optimistiske øvre endepunktene: 1,84 milliarder år i grenen begrenset av karbondioksid og 1,87 milliarder år i grenen begrenset av varme. Det er et kompakt sammendrag av to ulike scenarier. Det er ikke et tredje modellresultat med større presisjon, og det er ikke en beste anslagsdato.

Selv det bredere intervallet på 1,35 til 1,87 milliarder år har ikke én felles sannsynlighet. Nedre og øvre verdi avhenger av ulike antakelser om forvitring, ulike biologiske terskler og én klimamodellkonfigurasjon. Intervallet måler valgene i eksperimentet like mye som det måler tid.



Intervallet på 1,35 til 1,87 milliarder år oppstår først etter at man har valgt en forvitringsbane, en biologisk terskel og en modellgrense. Det er et kart over antakelser, ikke en klokke som ender med utryddelse av alt liv.

The Clean Paper CC BY 4.0

Andre grenser kan komme først

De lengste anslagene for den vegetative biosfæren nærmer seg en egen og usikker grense: et fuktig eller løpsk drivhus som kan føre til omfattende tap av hav. Klimamodeller er svært uenige om når slike tilstander begynner under økende solinnstråling, særlig langt fra dagens forhold. Noen anslag plasserer dem før den mest optimistiske fotosyntesegrensen.

Det betyr at den øvre grenen ikke kan leses som et løfte om at jorden vil beholde havene, kjente kontinenter eller beboelige overflateforhold frem til 1,87 milliarder år fra nå. Modellen omfatter heller ikke fremtidig platetektonikk, endringer i landareal, økosystemer i utvikling eller et fullt dynamisk hav. Beregningene av hvordan atmosfæren absorberer og avgir energi, presses også inn i regimer med intens solinnstråling og ekstremt lite karbondioksid, der ulike modeller spriker.

Evolusjonær tilpasning og teknologisk inngrep nevnes som muligheter i artikkelens diskusjon. De er ikke resultater fra de 29 klimasimuleringene. Modellen viser ikke fremtidige organismer som utvikler en fotosyntesevei ved én del per million, og den viser ikke en sivilisasjon som styrer atmosfæren i en milliard år.

Dette er ikke et resultat om dagens klimakrise

Solens økende lysstyrke virker over hundrevis av millioner til milliarder av år. Dagens menneskeskapte oppvarming skyldes raskt økende drivhusgasser over tiår og århundrer. Dette er ulike drivkrefter, på radikalt ulike tidsskalaer, som svarer på ulike spørsmål.

Ingenting i denne studien svekker dokumentasjonen for dagens klimaendringer eller taler for å utsette tiltak. En biosfære som kanskje beholder noe fotosyntetisk liv under ett fjernt modellscenario, er ikke det samme som et klima der dagens samfunn og økosystemer er trygge.

Artikkelen er verdifull fordi den gjør et fjernt spørsmål mer disiplinert. Den viser at tidligere, enklere modeller kan ha gitt for mye oppvarming når solinnstrålingen økte mens karbondioksidet ble holdt fast, og at fotosyntetisk liv kan ha flere veier til å bestå enn én kanonisk karbongrense antyder. Den viser også hvorfor hver ekstra brøkdel av en milliard år er knyttet til en kjede av antakelser.

Solen som gir næring til et blad, er i langsom endring. Om jorden forblir grønn i ytterligere 1,35, 1,87 eller et annet antall milliarder år, vil avhenge av at bergarter, vann, atmosfære og liv reagerer sammen. Det ærlige resultatet er ikke en dato. Det er et bredere syn på balansen.

Kort oppsummert

En tredimensjonal klimastudie spør hvor lenge jordens vegetative – fotosyntetiske – biosfære kan bestå mens solen langsomt blir mer lyssterk. Forskerne beregnet 29 separate klimaer i stasjonær tilstand og fulgte to illustrative yttertilfeller gjennom dem. Med svak forvitring og karbondioksid fast på 400 deler per million nås valgte varmegrenser for landplanter om omtrent 1,68 og 1,87 milliarder år. Med sterk forvitring og global middeltemperatur fast på 288 kelvin, omtrent 15 grader celsius, nås valgte karbondioksidgrenser for fotosyntese om omtrent 1,35, 1,64 og – ved bruk av en foreløpig terskel – 1,84 milliarder år. De ofte siterte 1,86 milliarder årene er bare det avrundede gjennomsnittet av de to optimistiske øvre endepunktene. Dette er scenarioavhengige modellintervaller, ikke en dato for når jorden, menneskeheten eller alt liv tar slutt. Modellen bruker foreskrevne baner, dagens geografi, et sjikthav og ingen eksplisitt kobling mellom jordbunn og vegetasjon eller mellom klima og forvitring, og de lengste anslagene nærmer seg usikre grenser for drivhus og tap av hav.

Nøktern vurdering

Dette viser artikkelen: I denne ExoCAM-konfigurasjonen varmes tredimensjonale klimaer generelt mindre opp under økende solinnstråling og fast karbondioksid enn de forenklede modellene som brukes til sammenligning. På tvers av to foreskrevne yttertilfeller for forvitring og flere valgte biologiske terskler ligger grensene for den vegetative biosfæren omtrent 1,35 til 1,87 milliarder år frem i tid.

Dette er plausibelt, men ikke fastslått: At enkelte CAM-planter eller vannplanter som bruker op-

pløst bikarbonat, kan opprettholde fotosyntese nær én del per million atmosfærisk karbondioksid; at tilpasning eller teknologi kan forlenge fotosyntetisk liv ytterligere; og at den virkelige klima- og forvitringsbanen vil forbli mellom modellens to yttertilfeller.

Dette viser den ikke: En fast dato for slutten på alle planter, alt liv, menneskelig sivilisasjon, jordens hav eller planeten; én kontinuerlig simulering av de neste to milliarder årene; eller noen grunn til å nedtone dagens menneskeskapte klimaendringer.

Viktigste begrensninger: Tjue-ni tilfeller i stasjonær tilstand fra én klimamodellfamilie; foreskrevne i stedet for dynamisk koblede forvitringsbaner; dagens geografi; et sjikthav; fast metan; null aksehelning og eksentrisitet; ingen eksplisitt jordbunn, vegetasjon eller tilbakekobling fra biosfæren; usikre terskler for varme og karbondioksid; og stor uenighet mellom modeller nær fuktige og løpske drivhusforhold.

Hvor stor tillit bør en vanlig leser ha? Høy tillit til at studien utvider det plausible modellintervallet og identifiserer antakelsene som styrer det. Moderat tillit til det numeriske spennet som en nyttig avgrensning innenfor denne modellen. Lav tillit til en nøyaktig dato, fordi de fjerneste endepunktene avhenger av bevisst 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