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

Eine dünne, halb geschmolzene erste Kruste: ein Modell, in dem Einschläge statt innerer Wärme das Hadaikum bestimmten

Das erste Äon der Erde, das Hadaikum, hinterließ fast kein Gesteinsarchiv. Diese Modellierungsstudie fragt, wie die Kruste ausgesehen hätte, wenn man Einschläge nicht ignoriert. Mit einem stochastischen, abnehmenden Einschlagsflussmodell und benchmarkten Simulationen des Wärmeflusses in Kruste und Mantel finden die Autoren, dass Einschlagswärme während des größten Teils des Hadaikums die gesamte innere Erdwärme um mindestens eine Größenordnung übertroffen hätte. Die Folge wäre eine dünne Kruste (unter etwa 5 km), die schon wenige Kilometer tief teilweise geschmolzen war — zu schwach, so argumentieren sie, für Plattentektonik und dazu neigend, sich in den Mantel zurückzurecyceln, was erklären würde, warum so wenig hadaisches Material überlebt. Als die Einschläge nach etwa 3,9 Ga nachließen, konnte dauerhafte kontinentale Kruste entstehen, gerade als die ältesten erhaltenen felsischen Gesteine auftauchen — in den vorsichtigen Worten der Autoren „wahrscheinlich kein Zufall". Weil sie bewusst konservative Untergrenzen der Erwärmung verwendeten, ist das qualitative Ergebnis robust, auch wenn die exakten Zahlen nicht feststehen. Ein starkes, kohärentes Modell der frühen Erde — keine direkte Beobachtung.

Written by Lucio Vaglio · Cross-checked by Laura Nesso · Edited by Michele Renda · Figures by Laura Nesso and Nova Vela · AI-assisted, human-reviewed

Paper: *Impact heating and the hidden Hadean*, Tim E. Johnson, Craig O'Neill, Simon Turner, Christopher L. Kirkland, Science (2026), 392:1408-1412 · DOI: 10.1126/science.aeb5402

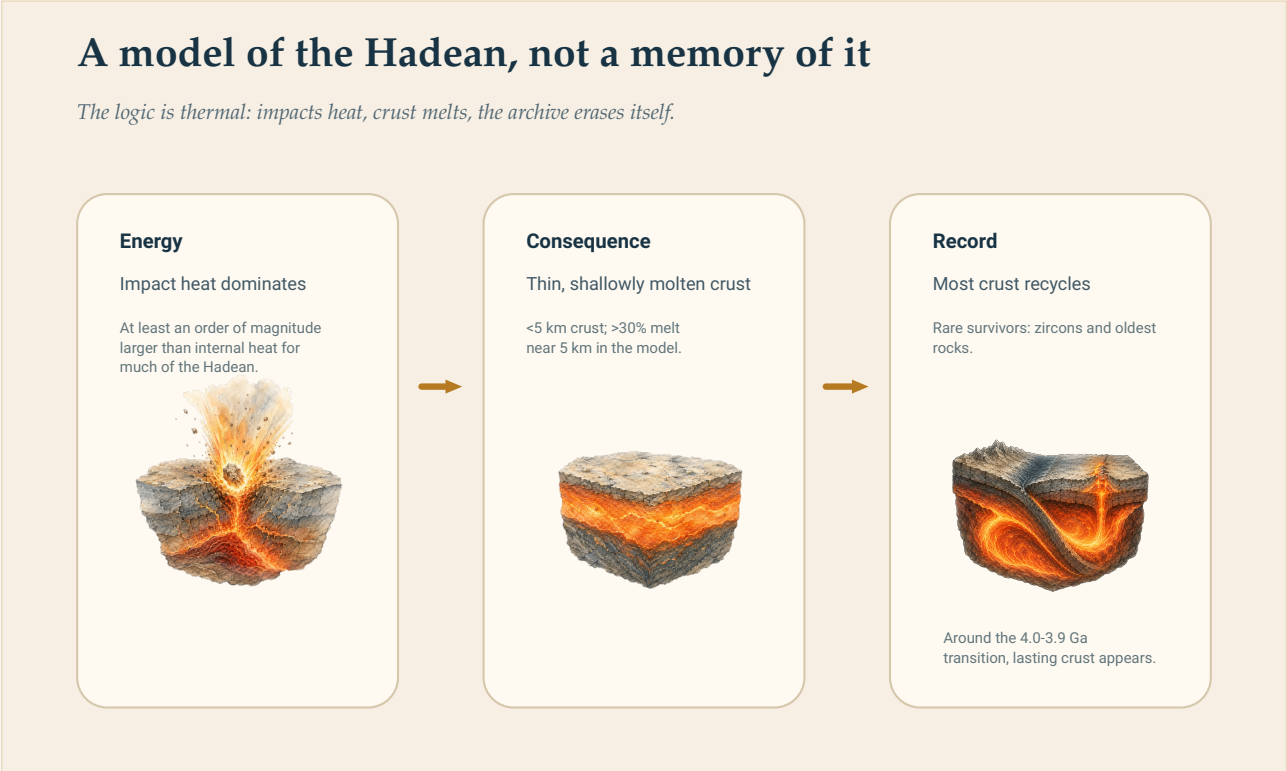
Das Kapitel der Erdgeschichte, von dem fast keine Seiten übrig sind

Die Erde ist der einzige Planet, von dem wir wissen, dass er Kontinente besitzt – jene auftriebsfähigen, siliziumreichen Landmassen, auf denen wir leben. Doch wie die ersten Kontinente entstanden, gehört zu den ältesten ungelösten Problemen der Geologie, und das aus einem brutalen Grund: Die Belege sind fast vollständig verschwunden.

Das erste Äon der Erde, das Hadaikum, reicht von der Entstehung des Planeten bis vor etwa 4,03 Milliarden Jahren (Ga). Aus diesem ersten halben Milliarden Jahren ist fast nichts erhalten. Die ältesten intakten felsischen Gesteine vom Kontinenttyp sind etwa 4,03 Ga alt. Einige wenige basaltische Gesteine reichen bis ungefähr 4,2 Ga zurück. Das älteste Material überhaupt sind vereinzelte Zirkonkristalle – am bekanntesten aus den Jack Hills in Westaustralien – mit einem Alter von 4,4 Ga. Das ist praktisch das gesamte Archiv der Kindheit unseres Planeten: eine Handvoll Fundorte und Mineralkörner in Sandkorngröße.

Diese Studie fügt diesem Archiv kein neues Gestein hinzu. Sie macht etwas anderes: Sie baut ein physikalisches Modell davon, wie die hadaische Kruste unter den damaligen Bedingungen ausgesehen haben könnte, und stellt eine Frage, die viele Modelle der frühen Erde auslassen. Was passiert, wenn man nicht länger ignoriert, dass die junge Erde bombardiert wurde?

Die Antwort der Autoren ist eindrucksvoll. Während des größten Teils des Hadaikums hätte die durch Einschläge eingetragene Wärme die gesamte innere Wärme der Erde bei Weitem übertroffen und eine dünne, halb aufgeschmolzene Kruste hinterlassen – nach ihrer Argumentation zu schwach für etwas, das moderner Plattentektonik ähnelt. Es ist ein Modell, keine Erinnerung. Aber immerhin ein Modell, das versucht, die Gewalt des Zeitalters zu berücksichtigen, das es beschreibt.



Einschlagswärme dominiert im Modell den Energiehaushalt; eine dünne, oberflächennah angeschmolzene Kruste recycelt sich selbst, und dauerhafte kontinentale Kruste erscheint erst um den Übergang von 4,0 zu 3,9 Ga. Es ist ein Modell des Hadaikums, keine direkte Erinnerung daran.

The Clean Paper CC BY 4.0

Was die Autoren gemacht haben

Das Team verband drei Bestandteile, die normalerweise getrennt behandelt werden.

Erstens ein **stochastisches Modell des Einschlagsflusses** – des Regens aus Asteroiden und größeren Körpern, die während Hadaikum und frühem Archaikum auf das innere Sonnensystem trafen. Entscheidend ist: Dies ist nicht die alte Vorstellung eines einzelnen Peaks des „Late Heavy Bombardment“. Der Fluss ist früh sehr hoch und **nimmt mit der Zeit ab**; große Einschläge treten zufällig (stochastisch) auf und nicht nach einem festen Zeitplan. Das Modell wurde aus Einschlagsstatistiken des Mondes und des inneren Sonnensystems skaliert und so gewählt, dass es mit Altersverteilungen von Zirkonen und den verfügbaren paläomagnetischen Befunden vereinbar ist.

Zweitens **geodynamische Simulationen** dazu, wie Wärme durch Kruste und oberen Mantel transportiert wird. Die Autoren verwendeten den benchmarkten Lattice-Boltzmann-Code Planet_LB und berechneten sowohl einfache eindimensionale Temperatur-Tiefen-Profile als auch vollständige zweidimensionale Konvektionsmomentaufnahmen des Mantels bei 4,1 Ga. Berücksichtigt werden gewöhnliche interne Wärmequellen – radioaktiver Zerfall und Wärme aus dem Erdkern – sowie, besonders wichtig, **magmatische Advektion**: Wärme, die durch aufsteigende Schmelze nach oben

getragen wird und in den meisten thermischen Krustenmodellen fehlt.

Drittens **Phasengleichgewichtsmodellierung** für eine realistische frühe Kruste – einen hydratisierten hadaischen Metabasalt aus dem Nuvvuagittuq-Grünsteingürtel –, um zu bestimmen, bei welchen Temperaturen und Tiefen ein solches Gestein zu schmelzen beginnt.

Eine methodische Entscheidung ist für die Einordnung des gesamten Papers wichtig: Die Autoren legten die Annahmen bewusst *gegen* ihre eigene Schlussfolgerung aus. Sie nahmen einen „nichtchondritischen" Mantel an, der weniger wärmeerzeugendes radioaktives Material enthält als die chondritische Referenz und weniger als die Hälfte der internen Wärmeproduktion des Standardmodells besitzt, verwendeten konservative Heizraten und ignorierten Gezeitenheizung durch den jungen, damals näheren Mond. Ihre berechneten Krustentemperaturen sind deshalb **Minimalwerte** – Untergrenzen. Wenn überhaupt, war das reale Hadaikum heißer als im Modell.

Was sie herausfanden

Einschläge, nicht innere Wärme, dominierten den Energiehaushalt des Hadaikums. Über die Zeit integriert übertrifft die Einschlagswärme den internen Beitrag deutlich – während des größten Teils des Hadaikums um mindestens eine Größenordnung. In diesem Bild ist Einschlagsheizung, nicht radioaktiver Zerfall, der wichtigste Antrieb der frühen Tektonik; erst nach ungefähr **3,9 Ga** wird sie zu einem kleineren Faktor.

Diese Wärme hielt die Kruste dünn und in geringer Tiefe teilweise geschmolzen. Ohne Einschläge und Schmelzadvektion ist die hadaische Kruste im Modell erst unterhalb von ungefähr 10–15 km teilweise geschmolzen. Nimmt man die Einschlagswärme hinzu, wandert die Schmelzzone dramatisch nach oben: Die Kruste ist bereits wenige **Kilometer unter der Oberfläche** teilweise geschmolzen (unter ungefähr 2–5 km). In etwa 5 km Tiefe sagen die Modelle mehr als 30 % Schmelze voraus – ein Zustand, in dem Gestein zu schwach ist, um als starre Platte zusammenzuhalten. In 5–10 km Tiefe bedeuten Temperaturen von ungefähr 1000–1100 °C, dass die Kruste fast unabhängig von ihrer Zusammensetzung weitgehend geschmolzen ist. Die verbleibende feste Kruste wäre **dünn, weniger als etwa 5 km**.

Eine halb geschmolzene Kruste löscht sich selbst aus. Umfangreiches Schmelzen erlaubt dichtem, eisen- und magnesiumreichem Material abzusinken und sich abzutrennen, während leichtere, siliziumreiche Schmelzen aufsteigen. Mit der Zeit verschiebt sich die durchschnittliche Krustenzusammensetzung dadurch zu stärker entwickelten, siliziumreicheren Gesteinen – und es entstehen felsische Schmelzen, aus denen Zirkon kristallisieren kann. Fast die gesamte dünne Kruste wäre anschließend wieder in den konvektierenden Mantel recycelt worden, was mit dem chemischen beziehungsweise isotopischen Archiv vereinbar ist. In diesem Modell ist das nahezu vollständige Fehlen hadaischer Gesteine keine Lücke im Archiv – es ist eine *Vorhersage*. Die 4,2 Ga alten Gesteine und die 4,4 Ga alten Zirkone wären seltene Überlebende einer Kruste, die fast ebenso schnell zerstört wurde, wie sie entstand.

Das Ende des Bombardements fällt mit den ersten dauerhaft erhaltenen Kontinenten zusammen. Als die Einschlagsrate über den Übergang von 4,0 zu 3,9 Ga nachließ, konnte die Kruste endlich dicker

werden und bestehen bleiben. Die ältesten erhaltenen kontinentalen Gesteine erscheinen ungefähr zur selben Zeit. Die Autoren formulieren vorsichtig: Dass dauerhafte kontinentale Kruste um diesen Zeitpunkt auftaucht, sei „wahrscheinlich kein Zufall“.

Ihre zentrale Schlussfolgerung: Unter diesen Bedingungen – dünne Kruste, wenige Kilometer unter der Oberfläche geschmolzen – ist **Plattentektonik im Hadaikum unplausibel**.

Sie zeigen außerdem, warum frühere Arbeiten zur gegenteiligen Schlussfolgerung kamen. Frühere Studien stochastischer Einschläge fanden nur geringe Effekte, mit weniger als 2,5 % der Kruste zu irgendeinem Zeitpunkt geschmolzen. Ihnen fehlten zwei Prozesse, die diese Studie einbezieht: der globale Einfluss großer Einschläge auf Schmelzen tief im Mantel und der Aufwärtstransport dieser Wärme durch aufsteigendes Magma. Fügt man beides hinzu, verändert sich das thermische Bild drastisch.

Warum ein Modell keine Erinnerung ist

Alles oben Beschriebene ist Ergebnis von Simulationen, nicht eine Messung an hadaischen Gesteinen – denn diese Gesteine existieren fast vollständig nicht mehr. Das macht das Ergebnis nicht schwach, legt aber fest, welche Art von Ergebnis es ist.

Die Kette lautet: Ein *Modell* des Einschlagsflusses speist ein *Modell* des Wärmeflusses in Mantel und Kruste, überprüft an einem *Modell* dafür, wie ein bestimmtes Gestein schmilzt. Jedes Glied ist physikalisch motiviert und, soweit möglich, benchmarkgetestet. Doch das Ganze ist ein kohärentes Argument darüber, wie das Hadaikum unter plausibler Physik *ausgesehen haben müsste*, nicht eine Messung dessen, wie es tatsächlich *aussah*.

Deshalb sind die konservativen Annahmen der Autoren wichtiger, als es zunächst erscheinen mag. Weil sie Untergrenzen für die Erwärmung verwendeten und dennoch eine weithin aufgeschmolzene flache Kruste erhielten, ist die qualitative Schlussfolgerung – die hadaische Kruste war heiß und schwach – gegenüber diesen Entscheidungen robust. Nicht exakt festgelegt sind dagegen die Zahlen: die genauen Geothermen, Schmelzanteile und Krustendicken. Die Richtung des Ergebnisses ist stark; die Dezimalstellen sind vorläufig.

Was dies *nicht* beweist

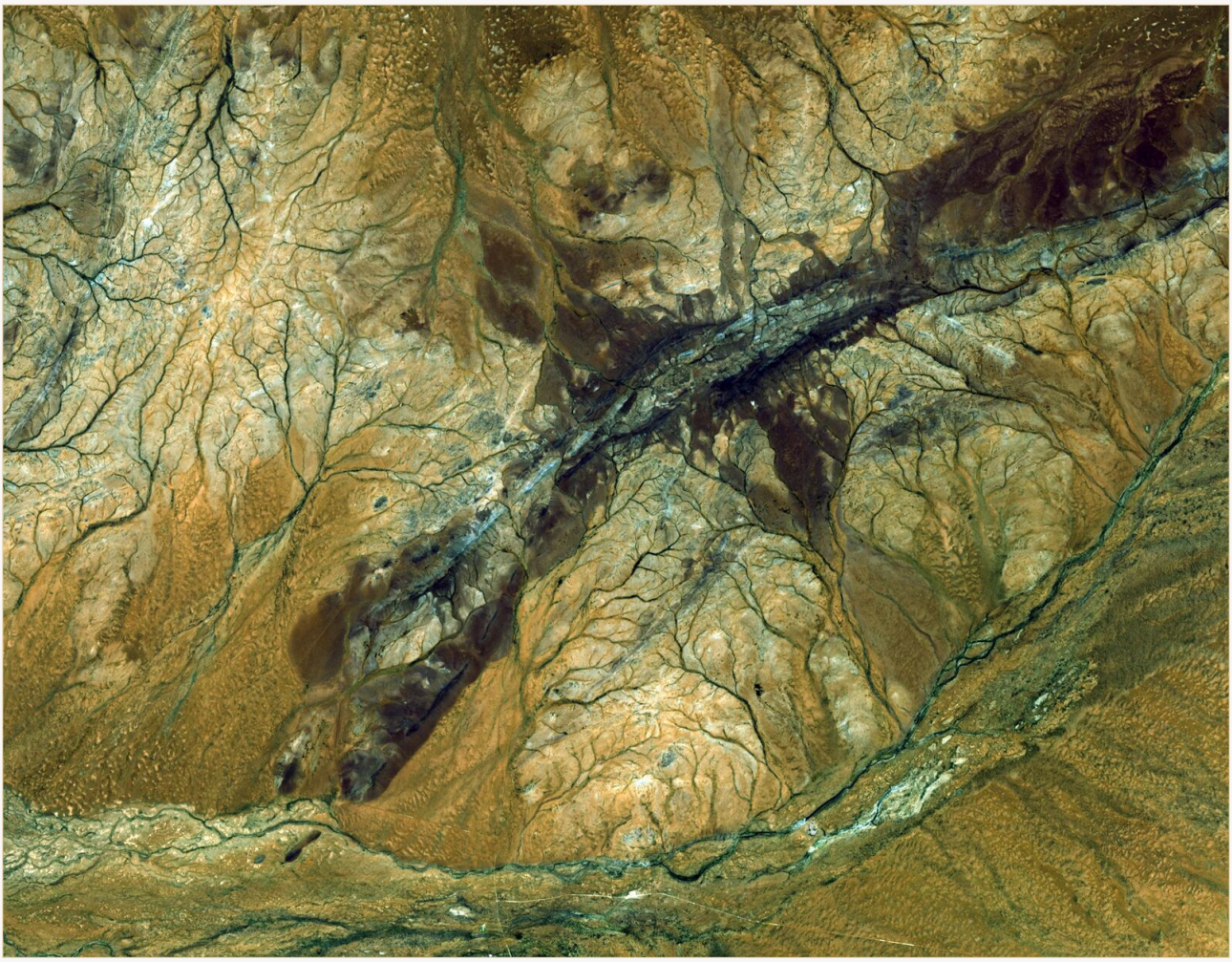
- Es **beobachtet die hadaische Kruste nicht direkt**. Aus dieser Zeit ist fast kein Gestein erhalten; es ist ein Modellresultat darüber, was die Physik impliziert, keine Messung.
- Es beruht **nicht auf einem „Late Heavy Bombardment“**. Verwendet wird ein abnehmender, stochastischer Einschlagsfluss – das Modell braucht keinen plötzlichen Bombardements-Peak und setzt keinen voraus.
- Es **entscheidet die Debatte um frühe Plattentektonik nicht endgültig**. „Unplausibel“ ist hier eine starke, physikalisch begründete Schlussfolgerung zugunsten einer heißen frühen Erde mit

stagnant lid oder squishy lid – doch der tektonische Modus des Hadaikums bleibt tatsächlich umstritten.

- Es beweist **nicht**, dass Einschläge die Entstehung der Kontinente am Übergang von 4,0 zu 3,9 Ga *verursachten*. Die zeitliche Übereinstimmung ist eine starke Assoziation, die die Autoren selbst „wahrscheinlich kein Zufall" nennen – sorgfältige Sprache für eine überzeugende Korrelation, nicht für bewiesene Kausalität.
- Die Zirkone aus Jack Hills sind **keine erhaltenen Kontinente**. Sie sind seltene Körner, die zeigen, dass felsisches Material und Wasser früh existierten; der Kern des Modells ist gerade, dass die Kruste, aus der sie stammten, größtenteils recycelt wurde.
- Es **rekonstruiert keine vollständige Geschichte der frühen Erde**. Die Simulationen sind idealisiert – 1D-Profile und 2D-Äquatorschnitte mit Einschlägen nahe dem Äquator, als Momentaufnahmen berechnet –, kein vollständiges vierdimensionales Modell des Planeten.

Wie belastbar sind die Belege?

Für die zentrale Aussage – dass Einschlagsheizung ein dominanter Faktor für die hadaische Kruste war und sie dünn sowie oberflächennah geschmolzen hielt – ist das Argument kohärent und in einem wichtigen Sinn konservativ. Es verwendet einen benchmarkten Geodynamik-Code, physikalisch vernünftige Eingaben und Untergrenzenannahmen und integriert eine Wärmequelle, die die meisten früheren Modelle schlicht ignorierten. Glaubwürdigkeit gewinnt es außerdem dadurch, dass es zwei hartnäckige Tatsachen zugleich erklärt: warum fast kein Gestein älter als ungefähr 4 Ga überlebt hat (nahezu vollständiges Recycling) und warum dauerhafte Kruste gerade dann erscheint, als das Bombardement abklingt.



Jack Hills in Westaustralien, aufgenommen vom ASTER-Instrument der NASA. Zirkone aus dieser Region gehören zu den ältesten bekannten erhaltenen Materialien aus der frühen Erdkruste — winzige Hinweise aus einem Äon, dessen Gesteine größtenteils ausgelöscht wurden.

NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS, and U.S./Japan ASTER Science Team fair-use

Die Grenzen sind ebenso klar und entsprechen den Grenzen jedes Tiefzeitmodells: Modelle werden auf Modelle gestapelt, verankert an einem äußerst spärlichen Gesteinsarchiv. Die zitierfähigste Schlussfolgerung – „Plattentektonik ist unplausibel“ – ist eine Ableitung, keine Beobachtung. Die richtige Haltung ist, dies als starke, gut begründete Hypothese zu behandeln, die das Hadaikum neu rahmt und andere nun dazu einlädt, ihre Annahmen zu testen – insbesondere die Wahl des Einschlagsflussmodells –, nicht als abgeschlossenen Fall.

Die nützlichste Zusammenfassung lautet weder „so war das Hadaikum“ noch „es ist nur eine Simulation“. Sie lautet: Unter plausibler, konservativer Physik hätte eine stark bombardierte frühe Erde eine dünne, halb geschmolzene, sich selbst recycelnde Kruste gehabt – und diese eine Idee erklärt überraschend viel von dem Wenigen, das wir tatsächlich beobachten können.

Warum das wichtig ist

Das populäre Bild der frühen Erde schwankt oft zwischen zwei Extremen: einer ruhigen, plattentektonischen Wasserwelt fast wie heute und einem höllischen Lavaplaneten. Diese Arbeit skizziert eine konkrete, physikalisch motivierte Mitte: eine dünne Kruste, die ab wenigen Kilometern Tiefe immer wieder aufgeschmolzen wurde, ständig zerstört und neu gebildet, wobei Einschläge – nicht innere Wärme – die Bedingungen bestimmten.

Diese Neuinterpretation leistet echte Arbeit. Sie bietet einen Mechanismus für zwei der wichtigsten Tatsachen über die Kindheit der Erde – das fast vollständige Fehlen eines Gesteinsarchivs und den Zeitpunkt der ersten dauerhaft erhaltenen Kontinente – und rückt einen meist vernachlässigten Prozess, Einschlagsheizung, ins Zentrum der Geschichte. Wenn das Modell Bestand hat, verändert es, wie wir darüber nachdenken, wann die Erde überhaupt zu einem Planeten stabiler Kontinente wurde. Und die Idee lässt sich auf andere Gesteinswelten übertragen, die unter ihrem eigenen Bombardement entstanden.

Nichts davon verlangt, dass dieses Modell das letzte Wort ist. Es muss nur eine ausreichend gute, prüfbare Hypothese sein – und indem es sich an die erhaltenen Zirkon- und Isotopendaten bindet, ist es das. Das „verborgene Hadaikum“ des Titels ist genau der Punkt: ein Zeitalter, das wir größtenteils nur durch Modellierung erreichen können, weil es seine eigenen Belege ausgelöscht hat.

Kurz zusammengefasst

Das erste Äon der Erde, das Hadaikum (vor ungefähr 4,03 Ga), hinterließ fast kein Gesteinsarchiv. Diese Modellierungsstudie fragt, wie die Kruste ausgesehen hätte, wenn man eine meist ausgelassene Wärmequelle einbezieht: Einschläge. Mit einem stochastischen, mit der Zeit abnehmenden Einschlagsflussmodell und benchmarkten 1D- und 2D-Simulationen des Wärmeflusses in Kruste und Mantel – einschließlich durch aufsteigende Schmelze transportierter Wärme – finden die Autoren, dass die zeitlich integrierte Einschlagswärme während des größten Teils des Hadaikums die gesamte innere Wärme der Erde um mindestens eine Größenordnung übertroffen hätte. Die Folge wäre eine dünne Kruste von weniger als ungefähr 5 km, die schon wenige Kilometer unter der Oberfläche teilweise geschmolzen ist und in etwa 5 km Tiefe zu mehr als 30 % aus Schmelze besteht – zu schwach, um Plattentektonik zu tragen, die die Autoren für das Hadaikum als unplausibel bezeichnen. Eine solche Kruste wäre größtenteils in den Mantel zurückrecycelt worden, was erklärt, warum so wenig hadaisches Material überlebt. Als die Einschläge über den Übergang von 4,0 zu 3,9 Ga nachließen, konnte dauerhafte kontinentale Kruste entstehen – ungefähr zu dem Zeitpunkt, an dem die ältesten erhaltenen felsischen Gesteine auftauchen, „wahrscheinlich kein Zufall“. Weil die Autoren bewusst konservative Untergrenzen für die Erwärmung verwendeten, ist das qualitative Ergebnis robust, auch wenn die exakten Zahlen nicht feststehen. Es ist ein starkes, kohärentes Modell der Kindheit der Erde – keine direkte Beobachtung.

Nüchtern geprüft

Was das Paper zeigt: In physikalisch fundierten Simulationen, die Einschlagsheizung und magmatischen Wärmetransport einbeziehen, wird die hadaische Kruste dünn und bereits wenige Kilometer unter der Oberfläche teilweise geschmolzen; Einschlagswärme dominiert gegenüber interner Wärme, die Kruste wird größtenteils in den Mantel recycelt und kann in diesem Modell keine Plattentektonik tragen.

Was plausibel, aber nicht bewiesen ist: Dass Einschläge der Grund dafür sind, dass dauerhafte Kontinente um 3,9 Ga erscheinen; dass das Hadaikum eine Welt mit stagnant lid oder squishy lid und nicht früher Plattentektonik war; dass fast kein hadaisches Gestein erhalten ist, weil eine geschmolzene Kruste sich selbst recycelte.

Was es nicht zeigt: Eine direkte Messung hadaischer Kruste; eine endgültige Antwort auf die Plattentektonik-Debatte; einen bewiesenen kausalen Zusammenhang zwischen abklingendem Bombardement und den ersten Kontinenten; dass die Jack-Hills-Zirkone erhaltene Kontinente darstellen; ein vollständiges Modell des frühen Planeten.

Wichtigste Einschränkungen: Das hadaische Gesteinsarchiv ist nahezu nicht existent, daher ist das Ergebnis ein Modell mit sehr wenigen Daten als Randbedingungen; Modelle bauen auf Modellen auf (Einschlagsfluss → Geodynamik → Phasengleichgewichte); der Einschlagsfluss selbst ist eine repräsentative, aber unsichere Wahl; die Simulationen sind idealisiert (1D- und 2D-Äquatorschnitte, Momentaufnahmen). Konservative Untergrenzen stärken die qualitative Schlussfolgerung, machen die konkreten Geothermen aber nicht präzise.

Wie viel Vertrauen sollte ein allgemeines Publikum haben? Hoch, dass eine stark bombardierte frühe Erde unter plausibler Physik eine heiße, dünne, oberflächennah angeschmolzene Kruste gehabt hätte. Moderat dafür, dass dies Plattentektonik im Hadaikum unwahrscheinlich macht und das fehlende Gesteinsarchiv erklärt. Niedrig für jede Behauptung, dies *beweise*, wie die Kontinente entstanden oder exakt wann – es ist ein starkes, konservatives Modell, das das Hadaikum neu rahmt, kein direkter Blick darauf.

Quellen

Johnson, O'Neill, Turner & Kirkland, Science 392:1408-1412 (2026)
https://doi.org/10.1126/science.aeb5402