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

'n Dun, halfgesmelte eerste kors: 'n model waarin impakte, nie interne hitte nie, die Hadeïkum beheer het

Die Aarde se eerste eon, die Hadeïkum, het byna geen gesteenterekord gelaat nie. Hierdie modelleringsstudie vra hoe die kors sou gelyk het wanneer impakte nie meer geïgnoreer word nie. Met 'n stogastiese, afnemende impakvloeimodel en getoetste simulasies van hittevloei deur kors en mantel vind die outeurs dat impakhitte vir die grootste deel van die Hadeïkum die Aarde se hele interne hitte met minstens 'n orde van grootte sou oorskry het, wat 'n dun kors (minder as ~5 km) net 'n paar kilometer onder die oppervlak gedeeltelik gesmelt sou laat — volgens hulle te swak vir plaattektoniek en geneig om terug in die mantel herwin te word, wat kan verklaar waarom so min Hadeïese materiaal oorleef. Namate impakte ná ~3,9 Ga afgeneem het, kon blywende kontinentale kors vorm, net wanneer die oudste oorlewende felsiese gesteentes verskyn — in die outeurs se versigtige woorde "waarskynlik nie toevallig nie". Omdat hulle doelbewus konserwatiewe ondergrensverhitting gebruik het, is die kwalitatiewe resultaat robuust al is die presiese getalle nie vas nie. Dit is 'n sterk, samehangende model van die Aarde se jeug — nie 'n direkte waarneming daarvan nie.

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

Die hoofstuk van die Aarde se verhaal waarvan byna geen bladsye oor is nie

Die Aarde is die enigste planeet waarvan ons weet wat kontinente het — die drywende, silikaryke land waarop ons almal leef. Tog is hoe die kontinente die eerste keer gevorm het een van die oudste onopgeloste probleme in geologie, en om ’n harde rede: die bewys het byna heeltemal verdwyn.

Die Aarde se eerste eon, die Hadeïkum, strek van die planeet se geboorte tot ongeveer 4,03 miljard jaar gelede (Ga). Van daardie eerste halfmiljard jaar het byna niks oorleef nie. Die oudste ongeskonde felsiese gesteentes (van die kontinentale tipe) is ongeveer 4,03 Ga oud. ’n Paar seldsame basaltiese gesteentes bereik ~4,2 Ga. Die oudste materiaal van enige soort is ’n verspreiding van sirkoonkristalle — veral dié uit die Jack Hills in Wes-Australië — wat tot 4,4 Ga gedateer is. Dit is die hele argief van die Aarde se jeug: ’n handvol plekke en minerale so groot soos sandkorrels.

Hierdie studie voeg nie ’n nuwe gesteente by dié argief nie. Dit doen iets anders: dit bou ’n fisiese model van hoe die Hadeïese kors onder dié fisika sou gelyk het, en vra ’n vraag wat die meeste vroeë-Aarde-modelle uitlaat. Wat gebeur wanneer ’n mens ophou ignoreer dat die vroeë Aarde gebombardeer is?

Die antwoord waartoe die outeurs kom, is opvallend. Vir die grootste deel van die Hadeïkum sou hitte wat deur impakte gelewer is al die Aarde se interne hitte oorweldig het, met ’n dun, halfgesmelte kors as gevolg — volgens hulle te swak vir enigiets soos moderne plaattektoniek. Dit is ’n model, nie ’n herinnering nie. Maar dit is ’n model wat vir ’n slag probeer rekening hou met die geweld van die tydperk wat dit beskryf.

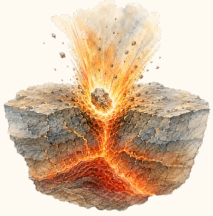
A model of the Hadean, not a memory of it

The logic is thermal: impacts heat, crust melts, the archive erases itself.

Energy

Impact heat dominates

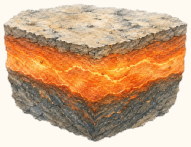
At least an order of magnitude larger than internal heat for much of the Hadean.



Consequence

Thin, shallowly molten crust

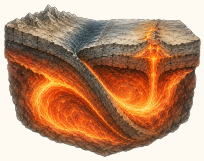
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



Around the 4.0-3.9 Ga transition, lasting crust appears.

Impakhitte oorheers die energiebegroting van die model, 'n dun kors wat vlak onder die oppervlak smelt herwin homself, en blywende kontinentale kors verskyn eers rondom die oorgang van 4,0–3,9 Ga. Dit is 'n model van die Hadeïkum, nie 'n direkte herinnering daaraan nie.

The Clean Paper CC BY 4.0

Wat die outeurs gedoen het

Die span het drie bestanddele gekombineer wat gewoonlik apart gehou word.

Eerstens, 'n **stogastiese model van die impakvloei** — die reën van asteroïdes en groter liggame wat deur die Hadeïkum en vroeë Argeïkum die binneste Sonnestelsel getref het. Belangrik: dit is nie die ou idee van 'n enkele "Late Heavy Bombardment"-piek nie. Dit is 'n vloei wat vroeg intens is en **met tyd afneem**, met groot impakte wat lukraak (stogasties) eerder as volgens 'n skedule plaasvind. Die model is herskaal vanaf maan- en binneste-Sonnestelsel-impakstatistiek en so gekies dat dit met sirkoon-ouderdomspektra en die beskikbare paleomagnetiese bewys verenigbaar is.

Tweedens, **geodinamiese simulasies** van hoe hitte deur die kors en boonste mantel beweeg. Hulle het 'n getoetste lattice-Boltzmann-kode (Planet_LB) gebruik, met sowel eenvoudige 1D-berekeninge van temperatuur teenoor diepte as volledige 2D-konveksie-momentopnames van die mantel by 4,1 Ga. Dit sluit die gewone interne hittebronne in — radioaktiewe verval en hitte uit die kern — en, belangrik, **magmatiese adveksie**: hitte wat deur opstygende smeltmateriaal na bo vervoer word, iets wat die meeste termiese korsmodelle weglaat.

Derdens, **fase-ewewigsmodellering** van 'n realistiese vroeë kors — 'n gehidreerde Hadeïese metabasalt uit die Nuvvuagittuq-groensteengordel — om uit te werk by watter temperatuur en diepte sulke gesteente sou begin smelt.

Een metodologiese keuse maak saak vir hoe die hele artikel gelees moet word: die outeurs het doelbewus die aannames *teen* hul eie gevolgtrekking gestapel. Hulle het 'n "nie-chondritiese" mantel aanvaar (een met minder hitteproduserende radioaktiewe materiaal as die chondritiese verwysing), met minder as die helfte van die interne verhitting van die standaardmodel, konserwatiewe verhittingstempo's gebruik en getyverhitting deur die jong, naby Maan geïgnoreer. Hul berekende korstemperature is dus **minimumwaardes** — ondergrense. Indien enigiets, was die werklike Hadeïkum warmer as hul model.

Wat hulle gevind het

Impakte, nie interne hitte nie, het die Hadeïese energiebegroting oorheers. Wanneer die impakhitte oor tyd geïntegreer word, verdwerg dit die interne bydrae — met minstens 'n orde van grootte vir die grootste deel van die Hadeïkum. In hierdie prentjie is impakverhitting, nie radioaktiewe verval nie, die belangrikste drywer van vroeë tektonisme, en dit vervaag eers ná ongeveer **3,9 Ga** tot 'n kleiner rol.

Daardie hitte het die kors dun en vlak gesmelt gehou. Sonder impakte en smeltadveksie gee die model ’n Hadeïese kors wat eers onder ongeveer 10–15 km gedeeltelik gesmelt is. Voeg impakhitte by en die smeltsone skuif dramaties op: die kors is net ’n **paar kilometer onder die oppervlak** reeds gedeeltelik gesmelt (onder ongeveer 2–5 km). Op sowat 5 km diepte voorspel die modelle meer as 30% smelt — ’n toestand waarin gesteente te swak is om as ’n stywe plaat saam te hou. Op 5–10 km beteken temperature van ~1000–1100°C dat die kors byna ongeag sy samestelling wyd gesmelt is. Die oorlewende vaste kors sou **dun, minder as ongeveer 5 km**, gewees het.

’n Halfgesmelte kors wis homself uit. Omvangryke smelting laat digte, yster- en magnesiumryke materiaal sink en uitskei, terwyl ligter, silikaryke smelte opstyg. Met tyd dryf dit die gemiddelde kors na meer ontwikkelde, silikaryke samestellings — en lewer dit die soort felsiese smelt waaruit sirkoon kan kristalliseer. Byna al hierdie dun kors sou daarna terug in die konvekterende mantel herwin word, wat met die chemiese (isotopiese) rekord strook. In hierdie model is die byna totale afwesigheid van Hadeïese gesteente nie bloot ’n gaping in die rekord nie — dit is ’n *voorspelling*. Die 4,2 Ga-gesteentes en 4,4 Ga-sirkoons is die seldsame oorlewendes van ’n kors wat grotendeels vernietig is so vinnig as wat dit gevorm het.

Die einde van die bombardement val saam met die eerste blywende kontinente. Namate die bombardement oor die oorgang van 4,0–3,9 Ga afgeneem het, kon die kors uiteindelik verdik en bly bestaan. Die oudste oorlewende kontinentale gesteentes verskyn ongeveer by dieselfde oorgang. Die outeurs formuleer dit versigtig: dat blywende kontinentale kors rondom dié tyd verskyn het, is “waarskynlik nie toevallig nie”.

Hul hoofafleiding: onder hierdie toestande — ’n dun kors wat ’n paar kilometer onder die oppervlak gesmelt is — is **plaattektoniek in die Hadeïkum onwaarskynlik**.

Hulle wys ook waarom vroeër werk die teenoorgestelde gevolgtrekking bereik het. Vorige studies van stogastiese impakte het net ’n klein effek gevind, met minder as 2,5% van die kors op enige tydstip gesmelt. Daardie studies het twee dinge weggelaat wat hierdie studie insluit: die globale effek van groot impakte op diep mantel-smelting, en die opwaartse vervoer van daardie hitte deur opstygende magma. Voeg albei terug, en die termiese prentjie verander drasties.

Waarom ’n model nie ’n herinnering is nie

Alles hierbo is die uitset van simulasies, nie ’n lesing uit Hadeïese gesteentes nie — want dié gesteentes bestaan byna heeltemal nie meer nie. Dit maak die resultaat nie swak nie, maar bepaal wel watter soort resultaat dit is.

Die ketting loop soos volg: ’n *model* van die impakvloei voed ’n *model* van hittevloei deur mantel en kors, gekontroleer teen ’n *model* van hoe ’n bepaalde gesteente smelt. Elke skakel is fisies gemotiveer en, waar moontlik, teen maatstawwe getoets — maar die geheel is ’n samehangende argument oor hoe die Hadeïkum onder aanneemlike fisika *moes* gelyk het, nie ’n meting van hoe dit *wel* gelyk het nie.

Daarom maak die outeurs se konserwatiewe aannames meer saak as wat dit dalk lyk. Omdat hulle

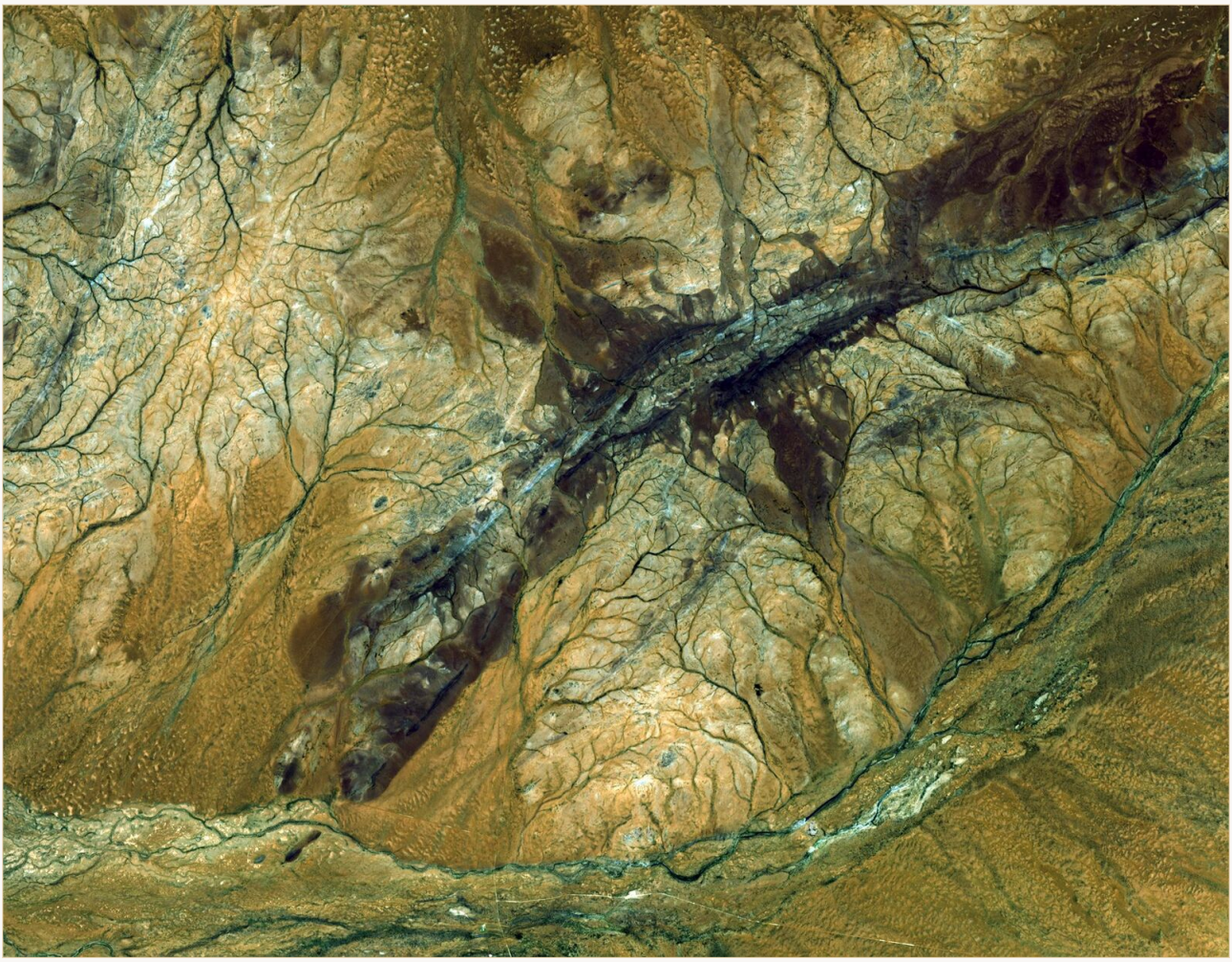
ondergrensverhitting gekies het en steeds 'n deurgaans vlak gesmelte kors gekry het, is die kwalitatiewe gevolgtrekking — die Hadeïese kors was warm en swak — redelik robuust teen hul keuses. Wat hiermee *nie* presies vasgepen word nie, is die presiese getal: die presiese geoterme, die presiese smeltfraksies, die presiese korsdikte. Lees die rigting van die resultaat as sterk en die desimale as voorlopig.

Wat dit *nie* bewys nie

- Dit **neem die Hadeïese kors nie direk waar nie**. Daar is byna geen gesteente uit dié era nie; dit is 'n modelleringsresultaat oor wat die fisika impliseer, nie 'n meting nie.
- Dit **berus nie op 'n "Late Heavy Bombardment" nie**. Die gebruikte impakvloei neem af en is stogasties — die model het nie 'n skielike bombardementspiek nodig nie en roep dit ook nie in nie.
- Dit **besleg nie die debat oor plaattektoniek nie**. "Onwaarskynlik" is hier 'n sterk, fisies gegronde afleiding ten gunste van 'n warm vroeë Aarde met 'n stagnante of sagte deksel — maar die tektoniese regime van die Hadeïkum bly werklik omstrede.
- Dit **bewys nie dat impakte die verskyning van kontinente rondom die 4,0–3,9 Ga-oorgang *veroorsaak* het nie**. Die tydsberekening stem sterk ooreen en die outeurs noem dit self "waarskynlik nie toevallig nie" — versigtige taal vir 'n oortuigende korrelasie, nie 'n gedemonstreerde oorsaak nie.
- Die Jack Hills-sirkoons is **nie bewaarde kontinente nie**. Dit is seldsame oorlewende korrels wat wys dat felsiese materiaal en water vroeg bestaan het; die hele punt van die model is dat die kors wat hulle gemaak het grotendeels weg herwin is.
- Dit **rekonstrueer nie 'n volledige geskiedenis van die vroeë Aarde nie**. Die simulasies is geïdealiseer — 1D-profiele en 2D-ewenaarsnitte met impakte naby die ewenaar, vasgelê as momentopnames — nie 'n volledige vierdimensionele model van die planeet nie.

Hoe sterk is die bewys?

Vir die sentrale aanspraak — dat impakverhitting 'n eerste-orde-beheer op die Hadeïese kors was en dit dun en vlak gesmelt gehou het — is die argument samehangend en, in 'n belangrike sin, konserwatief. Dit gebruik 'n getoetste geodinamikakode, fisies redelike insette en ondergrensaannames, en neem 'n hittebron in ag wat die meeste vorige modelle eenvoudig geïgnoreer het. Dit wen ook geloofwaardigheid deur twee hardnekkige feite tegelyk te verklaar: waarom byna geen gesteente ouer as ~4 Ga oorleef nie (byna totale herwinning), en waarom blywende kors verskyn net soos die bombardement afneem.



Jack Hills in Wes-Australië, soos gesien deur NASA se ASTER-instrument. Sirkoons uit hierdie streek sluit van die oudste bekende oorlewende materiaal uit die vroeë Aardkors in: piepklein leidrade uit 'n eon waarvan die gesteentes grotendeels uitgewis is.

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

Die beperkings is ewe duidelik, en dit is die beperkings van enige model van sulke diepe tyd: modelle wat op modelle gebou is, geanker aan 'n uiters yl gesteenterekord, en die mees aanhaalbare gevolgtrekking — "plaattektoniek is onwaarskynlik" — is 'n afleiding, nie 'n waarneming nie. Die regte houding is om dit as 'n sterk, goed beredeneerde hipotese te behandel wat die Hadeïkum herraam en ander uitnooi om die aannames te toets — veral die gekose impakvloeimodel — eerder as 'n geslote saak.

Die nuttigste opsomming is dus nóg "só was die Hadeïkum" nóg "dit is net 'n simulasie". Dit is: gegewe aanneemlike, konserwatiewe fisika sou 'n vroeë Aarde onder swaar bombardement 'n dun, halfgesmelte, selfherwinnende kors gehad het — en daardie een idee verklaar verbasend baie van die min wat ons werklik kan sien.

Waarom dit saak maak

Die gewilde beeld van die vroeë Aarde swaai gewoonlik tussen twee uiterstes: ’n rustige waterwêreld met plaattektoniek wat reeds amper soos vandag s’n is, of ’n helse lawaplaneet. Hierdie werk skets ’n spesifieke, fisies gemotiveerde middelweg: ’n dun kors wat telkens vanaf ’n paar kilometer diepte hersmelt, voortdurend vernietig en weer gevorm word, met impakte — nie interne hitte nie — wat die voorwaardes bepaal.

Daardie herraamwerk doen werklike werk. Dit bied een meganisme vir twee van die grootste feite uit die Aarde se jeug — die byna totale afwesigheid van ’n gesteenterekord en die tydsberekening van die eerste blywende kontinente — en plaas ’n gewoonlik verwaarloosde proses, impakverhitting, in die middel van die verhaal. As dit standhou, verander dit hoe ons dink oor wanneer die Aarde hoegenaamd ’n planeet van stabiele kontinente geword het, en dit is ook relevant vir ander rotswêrelde wat onder hul eie vroeë bombardemente gevorm het.

Niks hiervan vereis dat die model die laaste woord moet wees nie. Dit moet net ’n hipotese wees wat goed genoeg is om te toets — en deur hom aan die oorlewende sirkoon- en isotoperekord te koppel, is dit. Die “verborge Hadeïkum” van die titel is presies die punt: ’n era wat ons meestal net deur modellering kan bereik, omdat die era sy eie bewys uitgewis het.

Kortliks

Die Aarde se eerste eon, die Hadeïkum (voor ~4,03 Ga), het byna geen gesteenterekord gelaat nie. Hierdie modelleringsstudie vra hoe die kors sou gelyk het wanneer ’n hittebron wat gewoonlik weggelaat word, ingesluit word: impakte. Met ’n stogastiese, afnemende impakvloeimodel saam met getoetste 1D- en 2D-simulasies van hittevloei deur kors en mantel (insluitend hitte wat deur opstygende smeltmateriaal vervoer word), vind die outeurs dat tydgeïntegreerde impakhitte vir die grootste deel van die Hadeïkum die Aarde se hele interne hitte met minstens ’n orde van grootte sou oorskry het. Die gevolg is ’n dun kors (minder as ~5 km) wat net ’n paar kilometer onder die oppervlak gedeeltelik gesmelt is en op ~5 km diepte meer as 30% gesmelt is — volgens die outeurs te swak om plaattektoniek te onderhou, wat hulle vir die Hadeïkum onwaarskynlik noem. So ’n kors sou grotendeels terug in die mantel herwin word, wat kan verklaar waarom so min Hadeïese materiaal oorleef; namate impakte oor die 4,0–3,9 Ga-oorgang afgeneem het, kon blywende kontinentale kors vorm, ongeveer wanneer die oudste oorlewende felsiese gesteentes verskyn — “waarskynlik nie toevallig nie”. Omdat die outeurs doelbewus konserwatiewe ondergrensverhitting gebruik het, is die kwalitatiewe resultaat robuust al is die presiese getalle nie vas nie. Dit is ’n sterk, samehangende model van die Aarde se jeug — nie ’n direkte waarneming daarvan nie.

Nugtere beoordeling

Wat die artikel wys: In fisies gegronde simulasies wat impakverhitting en magmatiese hittetransport insluit, kom die Hadeïese kors dun en net 'n paar kilometer onder die oppervlak gedeeltelik gesmelt uit, oorheers deur impakhitte eerder as interne hitte, grotendeels terug in die mantel herwin en — volgens hierdie model — nie in staat om plaattektoniek te onderhou nie.

Wat aannemelik is maar nie bewys nie: Dat impakte die rede is waarom blywende kontinente rondom 3,9 Ga verskyn; dat die Hadeïkum 'n wêreld met 'n stagnante of sagte deksel eerder as vroeë plaattektoniek was; dat byna geen Hadeïese gesteente oorleef spesifiek omdat 'n gesmelte kors homself herwin het nie.

Wat dit nie wys nie: 'n Direkte meting van die Hadeïese kors; 'n beslegde antwoord op die plaattektoniekdebat; 'n gedemonstreerde oorsaaklike skakel tussen die afnemende bombardement en die eerste kontinente; dat die Jack Hills-sirkoons bewaarde kontinente voorstel; 'n volledige model van die vroeë planeet.

Belangrikste beperkings: Die Hadeïese gesteenterekord bestaan byna nie, dus is die resultaat 'n model wat deur baie min data beperk word; dit stapel modelle op modelle (impakvloei → geodinamika → fase-ewewig); die impakvloei self is 'n verteenwoordigende maar onseker keuse; die simulasies is geïdealiseer (1D- en 2D-ewenaarsnitte, momentopnames in tyd). Konserwatiewe ondergrensaannames versterk die kwalitatiewe gevolgtrekking maar maak die spesifieke geoterme nie presies nie.

Hoeveel vertroue behoort 'n algemene leser hierin te hê? Hoë vertroue dat 'n swaar gebombardeerde vroeë Aarde onder aanneemlike fisika 'n warm, dun, vlak gesmelte kors sou gehad het. Matige vertroue dat dit Hadeïese plaattektoniek onwaarskynlik maak en die ontbrekende gesteenterekord help verklaar. Lae vertroue in enige aanspraak dat dit *bewys* hoe kontinente gevorm het of presies wanneer — dit is 'n sterk, konserwatiewe model wat die Hadeïkum herraam, nie 'n direkte blik daarop nie.

Bronne

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