The Clean Paper

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

Een dunne, halfgesmolten eerste korst: een model waarin inslagen, niet interne warmte, het Hadeïcum bepaalden

Het eerste eon van de aarde, het Hadeïcum, liet bijna geen gesteentearchief na. Deze modelstudie vraagt hoe de korst eruit zou hebben gezien wanneer inslagen niet worden genegeerd. Met een stochastisch, afnemend model voor de inslagflux en gebenchmarkte simulaties van warmtestroming in korst en mantel vinden de auteurs dat inslagwarmte gedurende het grootste deel van het Hadeïcum minstens een orde van grootte groter zou zijn geweest dan alle interne warmte van de aarde. Dat laat in het model een korst van minder dan ~5 km over die al enkele kilometers onder het oppervlak gedeeltelijk gesmolten is — volgens de auteurs te zwak voor platentektoniek en geneigd zichzelf terug de mantel in te recyclen. Het is een sterk, coherent model van de jeugd van de aarde, geen directe observatie.

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

Het hoofdstuk van de aarde waarvan bijna alle pagina's verdwenen zijn

De aarde is de enige planeet waarvan we weten dat ze continenten heeft — drijvende, silica-rijke landmassa's waarop wij leven. Toch is de vraag hoe die continenten voor het eerst ontstonden een van de oudste onopgeloste problemen in de geologie, om een brute reden: vrijwel al het bewijs is weg.

Het eerste eon van de aarde, het Hadeïcum, loopt van het ontstaan van de planeet tot ongeveer 4,03 miljard jaar geleden (Ga). Van dat eerste halve miljard jaar is bijna niets bewaard. De oudste intacte felsische, continentachtige gesteenten zijn ongeveer 4,03 Ga oud. Een paar zeldzame basaltische gesteenten halen ~4,2 Ga. Het oudste materiaal van welke soort dan ook bestaat uit verspreide zirkoonkristallen — beroemd zijn die uit de Jack Hills in West-Australië — tot 4,4 Ga oud. Dat is vrijwel het hele archief van de jeugd van de aarde: een handvol vindplaatsen en mineralen ter grootte van zandkorrels.

Deze studie voegt geen nieuw gesteente aan dat archief toe. Ze doet iets anders: ze bouwt een fysisch model van hoe de Hadeïsche korst er onder die omstandigheden uit zou hebben gezien en stelt een vraag die in veel vroege-aardemodellen ontbreekt. Wat gebeurt er als je niet langer negeert dat de jonge aarde voortdurend werd gebombardeerd?

Het antwoord van de auteurs is opvallend. Gedurende het grootste deel van het Hadeïcum zou de warmte van inslagen alle interne warmtebronnen van de aarde hebben overvleugeld, waardoor de korst dun en halfgesmolten bleef — volgens hen te zwak voor iets dat op moderne platentektoniek lijkt. Het is een model, geen herinnering. Maar het is ten minste een model dat de gewelddadigheid van het tijdperk dat het probeert te beschrijven daadwerkelijk meeneemt.

A model of the Hadean, not a memory of it

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

Energy

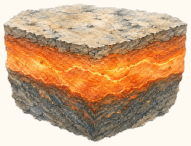
Impact heat dominates

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

Consequence

Thin, shallowly molten crust

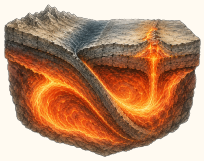
<5 km crust; >30% melt near 5 km in the model.



Record

Most crust recycles

Rare survivors: zircons and oldest rocks.



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

In het model domineert inslagwarmte het energiebudget, recyclet een dunne, ondiep deels gesmolten korst zichzelf en verschijnt duurzame continentale korst pas rond de overgang van 4,0 naar 3,9 Ga. Dit is een model van het Hadeïcum, geen directe herinnering eraan.

The Clean Paper CC BY 4.0

Wat de auteurs deden

Het team combineerde drie ingrediënten die meestal apart worden gehouden.

Ten eerste een **stochastisch model van de inslagflux** — de regen van asteroïden en grotere lichamen die het binnenste zonnestelsel gedurende het Hadeïcum en vroege Archeïcum trof. Cruciaal is dat dit niet de oude voorstelling van één piek van een “Late Heavy Bombardment” is. De flux is vroeg zeer hoog en **neemt in de tijd af**, terwijl grote inslagen willekeurig, stochastisch, arriveren in plaats van volgens een schema. Het model is herschaald uit inslagstatistiek van de maan en het binnenste zonnestelsel en gekozen om verenigbaar te zijn met zirkoonleeftijden en beschikbare paleomagnetische gegevens.

Ten tweede gebruikten ze **geodynamische simulaties** van warmtetransport door de korst en bovenmantel. Ze gebruikten een gebenchmarkte lattice-Boltzmanncode (Planet_LB), met zowel eenvoudige 1D-profielen van temperatuur tegen diepte als volledige 2D-snapshots van mantelconvectie rond 4,1 Ga. Daarin zitten de gewone interne warmtebronnen — radioactief verval en warmte uit de kern — en, belangrijk, **magmatische advectie**: warmte die door opstijgend smeltmateriaal omhoog wordt gedragen, iets wat veel thermische korstmodellen weglaten.

Ten derde deden ze **fase-evenwichtsmodellering** van een realistische vroege korst — een gehydrateerde Hadeïsche metabasalt uit de Nuvvuagittuq-greenstone belt — om te berekenen bij welke temperatuur en diepte zulk gesteente begint te smelten.

Eén methodologische keuze is belangrijk voor de lezing van het hele artikel: de auteurs stapelden de kaarten bewust *tegen* hun eigen conclusie. Ze namen een "niet-chondritische" mantel aan met minder warmteproducerende radioactieve elementen dan de chondritische referentie, dus minder dan de helft van de interne verwarming van het standaardmodel. Ze kozen conservatieve verwarmingssnelheden en negeerden getijdenverwarming door de jonge, nabije maan. Daardoor zijn hun berekende korsttemperaturen **minima** — ondergrenzen. Als er iets is, was het echte Hadeïcum waarschijnlijk warmer dan in het model.

Wat ze vonden

Inslagen, niet interne warmte, domineerden het Hadeïsche energiebudget. Geïntegreerd over de tijd is de inslagwarmte veel groter dan de interne bijdrage — gedurende het grootste deel van het Hadeïcum minstens een orde van grootte. In dit beeld is inslagverwarming, niet radioactief verval, de belangrijkste motor van vroege tektonische activiteit, en wordt ze pas na ongeveer **3,9 Ga** een bijzaak.

Die warmte hield de korst dun en ondiep deels gesmolten. Zonder inslagen en advectie van smelt geeft het model een Hadeïsche korst die pas onder ongeveer 10–15 km gedeeltelijk smelt. Voeg de inslagwarmte toe en de smeltzone schuift sterk omhoog: de korst is al op slechts **enkele kilometers diepte** gedeeltelijk gesmolten (grofweg onder 2–5 km). Rond 5 km voorspellen de modellen meer dan 30% smelt — een toestand waarin gesteente te zwak is om als stijve plaat bijeen te blijven. Op 5–10 km diepte liggen temperaturen rond ~1000–1100°C, zodat de korst vrijwel ongeacht samenstelling sterk gesmolten is. De overblijvende vaste korst zou **dun zijn geweest, minder dan ongeveer 5 km**.

Een halfgesmolten korst wist zichzelf uit. Bij sterke smelting kunnen dichte, ijzer- en magnesiumrijke materialen wegzakken en scheiden, terwijl lichtere, silica-rijke smelten opstijgen. Daardoor evolueert de gemiddelde korst geleidelijk richting meer gedifferentieerde, silica-rijke samenstellingen — en ontstaan felsische smelten waarin zirkoon kan kristalliseren. Vrijwel die hele dunne korst zou daarna weer de convecterende mantel in zijn gerecycled, in overeenstemming met het chemische, isotopische archief. In dit model is de bijna totale afwezigheid van Hadeïsch gesteente geen toevallig gat in het archief maar een *voorspelling*. De 4,2-Ga-gesteenten en 4,4-Ga-zirkonen zijn de zeldzame overlevenden van een korst die bijna zo snel werd vernietigd als ze ontstond.

Het einde van het bombardement valt samen met de eerste blijvende continenten. Toen de inslagflux rond de overgang 4,0–3,9 Ga afnam, kon de korst eindelijk dikker worden en blijven bestaan. De oudste bewaarde continentale gesteenten verschijnen rond dezelfde overgang. De auteurs formuleren het voorzichtig: dat duurzame continentale korst rond die tijd verschijnt is "waarschijnlijk geen toeval".

Hun hoofdconclusie: onder zulke omstandigheden — een dunne korst die al enkele kilometers onder het oppervlak gesmolten is — is **platentektoniek in het Hadeïcum onwaarschijnlijk**.

Ze laten ook zien waarom eerder werk tot de tegenovergestelde conclusie kwam. Vorige studies met stochastische inslagen vonden maar een klein effect, met op enig moment minder dan 2,5% van de korst gesmolten. Die studies lieten twee factoren weg die hier wel zijn meegenomen: het mondiale effect van grote inslagen op smelten diep in de mantel, en het omhoog transporteren van die warmte door opstijgend magma. Voeg beide terug toe en het thermische beeld verandert drastisch.

Waarom een model geen herinnering is

Alles hierboven komt uit simulaties, niet uit Hadeïsch gesteente — omdat dat vrijwel niet meer bestaat. Dat maakt het resultaat niet zwak, maar bepaalt wel welk soort resultaat het is.

De keten loopt zo: een *model* van de inslagflux voedt een *model* van warmtestroming in mantel en korst, gecontroleerd tegen een *model* van hoe een bepaald gesteente smelt. Elke schakel is fysisch gemotiveerd en waar mogelijk gebenchmarkt, maar het geheel is een coherent argument voor hoe het Hadeïcum er *moet* hebben uitgezien onder aannemelijke fysica, geen meting van hoe het er *daadwerkelijk* uitzag.

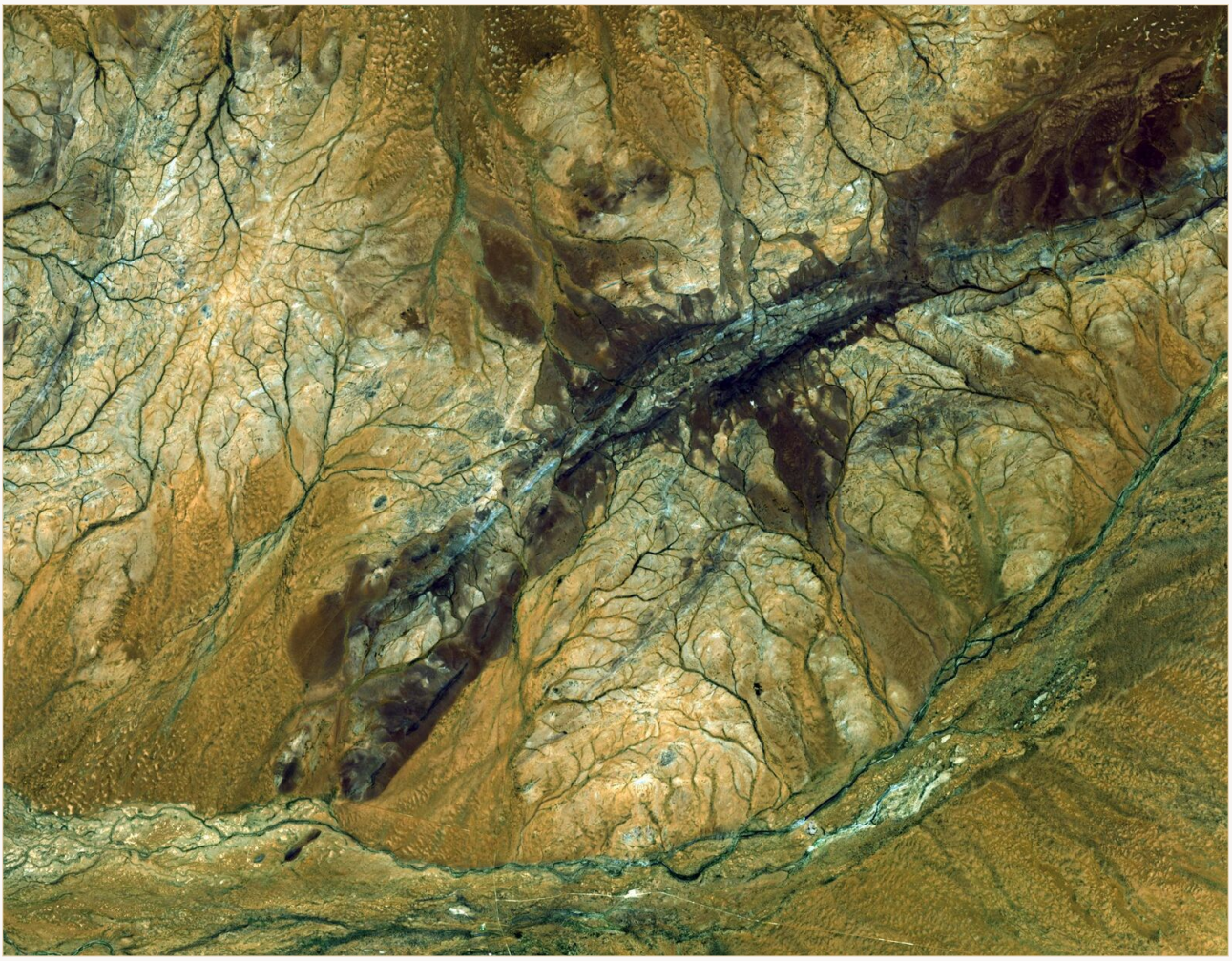
Daarom zijn de conservatieve aannames belangrijker dan ze lijken. Omdat de auteurs lagere-grensverwarming kozen en nog steeds een ondiepe korst vinden die op grote schaal gesmolten is, is de kwalitatieve conclusie — de Hadeïsche korst was heet en zwak — relatief robuust. Wat hiermee *niet* nauwkeurig wordt vastgepind zijn de exacte geothermen, smeltfracties en korstdiktes. Lees de richting van het resultaat als sterk en de decimalen als voorlopig.

Wat dit *niet* bewijst

- Het **observeert de Hadeïsche korst niet rechtstreeks**. Er is bijna geen gesteente uit deze tijd; dit is een modeluitkomst over wat de fysica impliceert, geen meting.
- Het steunt **niet** op een “Late Heavy Bombardment”. De gebruikte inslagflux is afnemend en stochastisch; het model heeft geen plotselinge inslagpiek nodig en roept die ook niet in.
- Het **beslecht het debat over platentektoniek niet**. “Onwaarschijnlijk” is hier een sterke, fysisch gemotiveerde inferentie ten gunste van een hete aarde met een stagnante of ‘squishy’ lid, maar het tektonische regime van het Hadeïcum blijft werkelijk omstreden.
- Het bewijst **niet** dat inslagen de continenten *veroorzaakten* rond de overgang 4,0–3,9 Ga. De timing komt sterk overeen en wordt door de auteurs “waarschijnlijk geen toeval” genoemd — dat is zorgvuldige taal voor een overtuigende correlatie, niet voor bewezen causaliteit.
- De zirkonen uit Jack Hills zijn **geen bewaarde continenten**. Het zijn zeldzame korrels die laten zien dat felsisch materiaal en water vroeg bestonden; het hele punt van het model is dat de korst waaruit ze kwamen grotendeels werd gerecycled.
- Het **reconstrueert geen volledige geschiedenis van de jonge aarde**. De simulaties zijn geïdealiseerd — 1D-profielen en 2D-equatoriale doorsneden met inslagen dicht bij de evenaar, genomen als snapshots — geen compleet vierdimensionaal model van de planeet.

Hoe sterk is het bewijs?

Voor de centrale claim — dat inslagverwarming een eerste-ordecontrole was op de Hadeïsche korst en haar dun en ondiep gesmolten hield — is het argument coherent en in een belangrijke zin conservatief. Het gebruikt een gebenchmarkte geodynamische code, fysisch redelijke input en ondergrensaannames, en neemt een warmtebron mee die de meeste eerdere modellen eenvoudig negeerden. Het wint bovendien geloofwaardigheid doordat één mechanisme twee hardnekkige feiten tegelijk kan verklaren: waarom vrijwel geen gesteente ouder dan ~4 Ga overleeft (bijna volledige recycling), en waarom duurzame korst precies verschijnt wanneer het bombardement afneemt.



Jack Hills in West-Australië, gezien door NASA's ASTER-instrument. Zirkonen uit dit gebied behoren tot het oudste bekende materiaal dat uit de vroege aardkorst is bewaard: piepkleine aanwijzingen uit een eon waarvan het gesteente grotendeels is uitgewist.

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

De grenzen zijn even duidelijk en horen bij elk model van zo'n diepe tijd: modellen gebouwd op modellen, verankerd aan een extreem schaars gesteentearchief, en de meest citeerbare conclusie — "platentektoniek is onwaarschijnlijk" — is een inferentie, geen observatie. De juiste houding is dit te zien als een sterke, goed gemotiveerde hypothese die het Hadeïcum herkadert en anderen uitnodigt

de aannames te testen — vooral de gekozen inslagflux — niet als een gesloten zaak.

De nuttigste samenvatting is dus noch “zo zag het Hadeïcum eruit” noch “het is maar een simulatie”. Het is: onder aannemelijke, conservatieve fysica zou een zwaar gebombardeerde jonge aarde een dunne, halfgesmolten, zichzelf recyclerende korst hebben — en dat ene idee verklaart verrassend veel van het weinige dat we werkelijk kunnen zien.

Waarom het ertoe doet

Het populaire beeld van de vroege aarde slingert meestal tussen twee uitersten: een kalme waterwereld met platentektoniek die al op de huidige lijkt, of een helse lavaplaneet. Dit werk schetst een specifieke, fysisch gemotiveerde middenweg: een dunne korst die vanaf enkele kilometers diepte telkens opnieuw smolt, voortdurend werd vernietigd en opnieuw gevormd, met inslagen — niet interne warmte — als bepalende factor.

Die herinterpretatie doet echt werk. Ze biedt één mechanisme voor twee van de grootste feiten uit de jeugd van de aarde — de bijna volledige afwezigheid van een gesteentearchief en de timing van de eerste blijvende continenten — en zet een meestal verwaarloosd proces, inslagverwarming, midden in het verhaal. Als het overeind blijft, verandert het hoe we redeneren over wanneer de aarde überhaupt een planeet van stabiele continenten werd. Het is bovendien relevant voor andere rotsplaneten die onder hun eigen vroege bombardementen zijn gevormd.

Daarvoor hoeft het model niet het laatste woord te zijn. Het hoeft alleen een hypothese te zijn die goed genoeg is om te testen — en doordat het aan het overlevende zirkoon- en isotopenarchief wordt gekoppeld, is het dat. Het “verborgen Hadeïcum” uit de titel is precies het punt: een tijdperk dat we grotendeels alleen via modellen kunnen bereiken, omdat het zijn eigen bewijs heeft uitgewist.

Heldere samenvatting

Het eerste eon van de aarde, het Hadeïcum (vóór ~4,03 Ga), liet bijna geen gesteentearchief na. Deze modelstudie vraagt hoe de korst eruit zou hebben gezien als je een meestal weggelaten warmtebron meeneemt: inslagen. Met een stochastisch, afnemend model voor de inslagflux en gebenchmarkte 1D- en 2D-simulaties van warmtestroming in korst en mantel — inclusief warmte die door opstijgend smeltmateriaal wordt vervoerd — vinden de auteurs dat de over de tijd geïntegreerde inslagwarmte gedurende het grootste deel van het Hadeïcum minstens een orde van grootte groter zou zijn geweest dan alle interne warmte van de aarde. Het gevolg is een dunne korst (minder dan ~5 km) die al op enkele kilometers diepte gedeeltelijk gesmolten is en rond 5 km meer dan 30% smelt bevat — volgens de auteurs te zwak voor platentektoniek. Zo’n korst zou grotendeels terug de mantel in recyclen, wat kan verklaren waarom zo weinig Hadeïsch materiaal overleeft. Toen de inslagen rond 4,0–3,9 Ga afnamen, kon duurzame continentale korst ontstaan, ongeveer wanneer de oudste bewaarde felsische gesteenten verschijnen — “waarschijnlijk geen toeval”. Omdat de auteurs bewust conservatieve, lagere-grensaannames voor verwarming gebruikten, is de kwalitatieve richting robuust, ook al liggen

de exacte getallen niet vast. Het is een sterk, coherent model van de jeugd van de aarde — geen directe observatie ervan.

Zonder omwegen

Wat het artikel laat zien: In fysisch gemotiveerde simulaties die inslagverwarming en magmatisch warmtetransport meenemen, komt de Hadeïsche korst dun en al op enkele kilometers diepte deels gesmolten uit het model, gedomineerd door inslagwarmte in plaats van interne warmte, grotendeels terug de mantel in gerecycled en — in dit model — niet in staat platentektoniek te dragen.

Wat aannemelijk is maar niet bewezen: Dat inslagen de reden zijn dat duurzame continenten rond 3,9 Ga verschijnen; dat het Hadeïcum een stagnante of zachte-lidwereld was in plaats van een wereld met vroege platentektoniek; dat bijna geen Hadeïsch gesteente overleeft specifiek doordat een gesmolten korst zichzelf recyclede.

Wat het niet laat zien: Een directe meting van Hadeïsche korst; een definitief antwoord op het debat over platentektoniek; een bewezen causale koppeling tussen afnemend bombardement en de eerste continenten; dat de Jack Hills-zirkonen bewaarde continenten voorstellen; een volledig model van de jonge planeet.

Belangrijkste beperkingen: Het Hadeïsche gesteentearchief bestaat vrijwel niet, dus het resultaat is een model dat door heel weinig data wordt begrensd; het stapelt modellen op modellen (inslagflux → geodynamica → fase-evenwicht); de inslagflux zelf is een representatieve maar onzekere keuze; de simulaties zijn geïdealiseerd (1D- en 2D-equatoriale doorsneden, snapshots in de tijd). Conservatieve ondergrensaannames versterken de kwalitatieve conclusie maar maken specifieke geothermen niet precies.

Hoeveel vertrouwen mag een algemene lezer hierin hebben? Hoog vertrouwen dat een zwaar gebombardeerde vroege aarde onder aannemelijke fysica een hete, dunne, ondiep gesmolten korst zou hebben. Matig vertrouwen dat dit Hadeïsche platentektoniek onwaarschijnlijk maakt en het ontbrekende gesteentearchief helpt verklaren. Laag vertrouwen in elke claim dat dit *bewijst* hoe continenten ontstonden of precies wanneer. Het is een sterk, conservatief model dat het Hadeïcum herkadert, geen directe blik erop.

Bronnen

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