

# Warmteproductie in de Aarde?

keuzeopdracht natuurkunde voor vwo 6

**Een verrijkende opdracht over warmte, de aarde en radioactiviteit**

**Voorkennis: Warmte; soortelijke warmte; vermogen; straling, stroming en geleiding; algemene gravitatiewet; radioactief verval**

**Omvang: 10 sl**

© 2013 Universiteit Utrecht, JCU

Vulkanen brengen hete magma naar boven. Ook uit de mijnbouw weten we: hoe dieper je in de Aarde afdaalt, hoe hoger de temperatuur. Door het temperatuurverschil stroomt er warmte naar het oppervlak. Daardoor geeft de Aarde warmte af. Hoe wordt die warmte geproduceerd? Werd de Aarde heet gevormd en is die nu nog steeds langzaam aan het afkoelen? Of is er iets anders aan de hand? In deze verrijkingsopdracht ga je die vragen beantwoorden, onder andere door te schatten, berekeningen uit te voeren en modellen te maken.

## Oriëntatie

De 19<sup>e</sup>-eeuwse Engelse fysicus Lord Kelvin bedacht voor de warmteproductie van de Aarde een eerste wiskundig model. Kelvin ging uit van een geleidelijke afkoeling van de Aarde door warmteafgifte aan het aardoppervlak, beginnend op het moment dat het aardoppervlak vanuit gesmolten toestand vast geworden was.

### Vraag 1. Een afkoelende Aarde

Geologen hebben gemeten dat het warmtevermogen  $J$  dat gemiddeld over de Aarde, per vierkante meter aan het aardoppervlak wordt afgegeven, is nu  $J = 70 \cdot 10^{-3} \text{ W m}^{-2}$ .

- Bereken het warmtevermogen dat nu door de Aarde als geheel wordt afgegeven.
- Schat op grond van gegevens uit BINAS de gemiddelde soortelijke warmte van de Aarde.
- Hoeveel warmte moet de Aarde afgeven om  $1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  in temperatuur te dalen? Hoe lang duurt dat bij het huidige uitgestraalde vermogen?
- Welke invloed heeft het stollen van vloeibaar gesteente onder het aardoppervlak op deze schattingen?
- Kan het geleidelijk afkoelen van de Aarde, zonder interne warmteproductie, de (in de 19<sup>e</sup> eeuw geschatte) ouderdom van de Aarde (meer dan 100 miljoen jaar) verklaren? Geef argumenten.

Kelvin kwam uit op een tijdsverloop, sinds stolling van het aardoppervlak, van hooguit veertig miljoen jaar, aanzienlijk korter dan in zijn tijd werd geschat op grond van geologische gegevens, zoals dikte van sedimentpakketten gecombineerd met waargenomen erosie- en sedimentatiesnelheden. Dat wees eerder een leeftijd van honderden miljoenen jaren.

Kortom, de Aarde koelt heel langzaam (of zelfs helemaal niet meer) af, veel langzamer dan je zou verwachten uit de hoeveelheid afgegeven warmte. Er moet dus in de loop van de tijd extra warmte opgewekt zijn en nog steeds opgewekt worden. Maar wat kan de warmtebron zijn?

### Vraag 2. Chemische processen als interne warmtebron?

- Hoeveel warmte moet er sinds het ontstaan van de Aarde, 4,6 miljard jaar geleden, extra geproduceerd worden om de leeftijd van de Aarde en het uitgestraalde vermogen te verklaren?

In de 19<sup>e</sup> eeuw kon men zich nog maar enkele mogelijke interne warmtebronnen voorstellen. De meest voor de hand liggende waren chemische processen, bijvoorbeeld verbranding van fossiele brandstoffen.

- 
- b. Maak met behulp van gegevens uit BINAS een schatting hoeveel 'energierijke' massa (steenkool bijvoorbeeld) per seconde chemisch omgezet moet worden om de huidige warmteafgifte van de Aarde mogelijk te maken.
- c. Geef je conclusie: is een chemische proces als energiebron waarschijnlijk?
- 

De rest van deze opdracht bestaat uit drie onderzoeksdelen.

In onderzoeksdeel 1 ga je andere mogelijke oorzaken van interne of externe warmteproductie na, die in de 19<sup>e</sup> eeuw denkbaar waren.

Een nieuwe oorzaak werd denkbaar toen aan het begin van de 20e eeuw de natuurlijke radioactiviteit werd ontdekt. In onderzoeksdeel 2 ga je deze mogelijkheid onderzoeken.

In onderzoeksdeel 3 kijk je of de warmteproductie verantwoordelijk kan zijn voor gebergtevorming en vulkanen.

Afhankelijk van hoeveel tijd je voor de opdracht hebt, kun je kiezen welk onderzoeksdeel (of – delen) je gaat uitwerken. Lees daartoe de onderzoeksdelen eerst oppervlakkig door, en bespreek je keuze met je docent.

## Onderzoeksdeel 1: op zoek naar warmtebronnen - de 19<sup>e</sup> eeuw

In de negentiende eeuw waren onder andere de volgende mogelijke processen kandidaat voor de warmteproductie in de Aarde:

- Een krimpende Aarde
- De warmte-instraling door de zon
- Inslag van meteorieten
- Getijdenwerking van zon

In dit deel ga je na of deze oorzaken de lange levensduur van de Aarde kunnen verklaren.

---

### Vraag 3. Inkrimping van de Aarde als warmtebron?

---

Stel dat de straal van de Aarde 1 m kleiner wordt doordat de Aarde 'inklinkt',

- a. Hoeveel energie levert dat op?
  - b. Hoe lang kan inkrimping van de Aarde zorgen voor de huidige warmteafgifte aan het aardoppervlak?
  - c. Kan het krimpen van de Aarde de bron zijn van de interne warmteproductie?
- 

---

### Vraag 4. Warmte-instraling door de zon als warmtebron?

---

De Aarde krijgt voortdurend energie toegevoerd door de Zon.

Kan deze warmte-instraling van de zon leiden tot de warmteafgifte aan het aardoppervlak?

---

---

### Vraag 5. Meteorietinslagen als warmtebron?

---

De massa van de Aarde neemt toe omdat kleine en (soms) grote brokken materie (meteorieten) vanuit de ruimte op de Aarde terechtkomen. Daarbij wordt potentiële energie omgezet, die vrij kan komen in de vorm van warmteproductie.

- a. Schat hoeveel kg ruimtematerie per jaar gemiddeld in de afgelopen miljoenen jaren moet zijn ingevangen om de warmteproductie van de Aarde te kunnen verklaren. Hint: gebruik de algemene gravitatiewet van Newton en bijbehorende potentiële (gravitatie)energie.
  - b. Zoek op hoeveel materie de Aarde tegenwoordig per jaar invangt. Zie bijvoorbeeld <http://www.astronomie.nl/encyclopedie>.
  - c. Kunnen meteorietinslagen de gezochte warmtebron zijn?
- 

---

### Vraag 6. Getijdendeformatie van de vaste Aarde door de Zon als warmtebron?

---

De Aarde wordt aangetrokken door de Zon en draait in een elliptische baan om de zon heen. Tegelijkertijd draait de Aarde om zijn eigen as. Een en ander heeft getijdenkrachten tot gevolg. Die veroorzaken (met de invloed van de Maan) eb en vloed in het vloeibare deel van de Aarde. Maar de getijdenkrachten hebben ook gevolgen voor de vorm van de Aarde als geheel. Dagelijks wordt de Aarde een beetje vervormd en daardoor wordt warmte opgewekt ten kost van potentiële energie: de Aarde komt een heel klein beetje dichterbij de zon te staan.

---

- Ga na hoeveel de straal van de aardbaan om de zon in 1 miljoen jaar afneemt als het warmtevermogen dat aan het aardoppervlak wordt afgegeven geheel door getijdenwerking in de vaste Aarde zou worden geleverd.
- Acht je dit de gezochte warmtebron?

### Vraag 7. Combinaties van 19<sup>e</sup>-eeuwse verklaringen?

- Kun je nog andere mogelijke oorzaken voor de warmteproductie bedenken (behalve radioactiviteit en kernreacties die pas in de 20<sup>e</sup> eeuw werden bedacht)? Zo ja, maak ook daarvoor een schatting of die in overeenstemming zijn met de lange levensduur van de Aarde.
- Kan een combinatie van twee of meer '19<sup>e</sup>-eeuwse verklaringen' een oplossing bieden?

## Onderzoeksdeel 2: Radioactief verval in de Aarde als mogelijk warmtebron

Met de ontdekking van radioactiviteit was er een nieuwe kandidaat voor de warmtebron van de Aarde. Bij radioactief verval komt immers energie vrij. Zitten er radioactieve stoffen in de Aarde? En als dat zo is, levert hun verval dan genoeg energie?

Van meteorieten die op de Aarde vallen weten we dat ze radioactieve isotopen bevatten met een lange halveringstijd, zoals <sup>232</sup>Thorium, <sup>238</sup>Uranium, <sup>235</sup>Uranium en <sup>40</sup>Kalium. Als de Aarde en de meteorieten ooit tegelijk ontstaan zijn uit hetzelfde materiaal, dan moeten diezelfde stoffen ook in de Aarde aanwezig zijn.

Radioactief verval verloopt volgens een exponentieel verband:

$$N(t) = N(0) \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Hierin is  $N(t)$  het aantal radioactieve deeltjes op tijdstip  $t$ ,  $N(0)$  het aantal op  $t = 0$ ,  $t$  de verlopen tijd en  $t_{1/2}$  de halveringstijd. In een halveringstijd vervalt de helft van het aantal deeltjes, deze tijd is karakteristiek voor het isotoop (zie Tabel 25 BINAS).

Bij het verval komt energie vrij, die in de Aarde vrijwel geheel omgezet wordt in warmte. De warmteproductiviteit ( $H$  in W/kg), het door radioactiviteit geproduceerde warmtevermogen (in watt) per massa (in kg), is evenredig met het aantal deeltjes dat vervalt per tijdseenheid,  $H \sim dN/dt$ . Daarmee kan je uit de vorige formule afleiden dat de warmteproductie per isotoop verloopt volgens

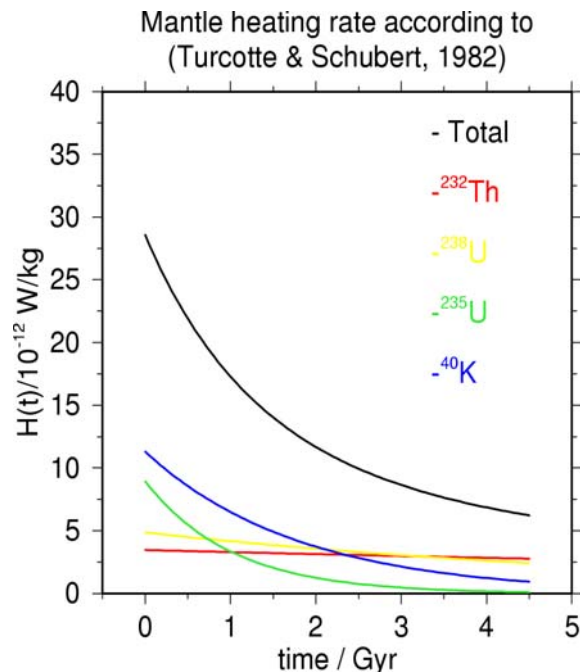
$$H(t) = H(0) \times \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Omdat de halveringstijd  $t_{1/2}$  verschilt per isotoop, verandert de samenstelling van de mix van radioactieve stoffen continu.

### Vraag 8. Warmteproductie door radioactief verval

Bij het ontstaan van de Aarde, 4,6 miljard jaar geleden, was de totale warmteproductiviteit van de radioactieve isotopen ongeveer

$$H_{\text{totaal}}(0) = 29 \cdot 10^{-12} \text{ W kg}^{-1}.$$



Figuur 1. Warmteproductiviteit van een radioactieve brandstofmix van chondritische samenstelling gedurende de evolutie van de Aarde. De tijd loopt van 0, bij het ontstaan van de Aarde, tot de huidige dag ongeveer 4,5 miljard jaar (Gyr) later. De bovenste, zwarte curve geeft de opgetelde warmteproductiviteit van de gezamenlijke isotopen weer.

---

De bijdragen van de verschillende isotopen waren (zie figuur1):

$^{232}\text{Thorium}$ :  $3 \cdot 10^{-12} \text{ W kg}^{-1}$

$^{238}\text{Uranium}$ :  $5 \cdot 10^{-12} \text{ W kg}^{-1}$

$^{235}\text{Uranium}$ :  $9 \cdot 10^{-12} \text{ W kg}^{-1}$

$^{40}\text{Kalium}$ :  $12 \cdot 10^{-12} \text{ W kg}^{-1}$

- Waarvan is de  $H(0)$ , de  $H$  toen de Aarde ontstond, van elk isotoop afhankelijk?
- Hoe groot zijn de bijdragen van die isotopen aan de warmteproductiviteit van de Aarde nu? Welke isotopen zijn nu dus het belangrijkste voor de warmteproductie?
- Hoe groot is  $H_{\text{totaal}}$  nu? Je kunt dit schatten uit de figuur en/of berekenen.
- Welke isotopen waren in het begin het belangrijkste? Verklaar het verschil tussen  $H(\text{nu})$  en  $H(0)$  met de verschillen in halfwaardetijd.
- Uit geologische gegevens is af te leiden dat de Aarde sinds zijn vorming is afgekoeld. Vergelijk het vermogen dat aan de aardoppervlak wordt afgegeven (gegeven in vraag 1) met het vermogen dat in de Aarde als geheel door radioactiviteit wordt opgewekt. Koelt de Aarde nog steeds af?
- Bereken hoe lang het ongeveer duurt voor de Aarde 1 K is afgekoeld of opgewarmd.
- Wat is je conclusie voor radioactiviteit als de gezochte warmtebron?

---

### Vraag 9. Nader onderzoek naar radioactief verval in de Aarde

- Kies een idee voor verder onderzoek naar de radioactiviteit in de Aarde. Hieronder vind je een paar suggesties:
- Gebruik de gegevens uit de figuur en BINAS om te schatten hoe lang het duurt tot de nucleaire brandstof van de Aarde op is. Wat gebeurt er dan met de temperatuur van de Aarde? (Met 'op' bedoelen we dat de warmteproductiviteit is afgenomen tot  $1 \cdot 10^{-12} \text{ W/kg}$ . Kijk hierbij alleen naar de halveringstijd van de isotoop die nu en ook in de toekomst het belangrijkste is, en neem een beginwaarde van  $5 \cdot 10^{-12} \text{ W/kg}$ .)
- Bereken nu deze periode exact (met je GR).
- Vaak wordt in modellen voor de interne verwarming van de Aarde een gemiddelde isotopensamenstelling aangenomen met een soort gemiddelde van de halveringstijden. Dit model voorspelt een huidige warmteproductie van ongeveer  $5 \cdot 10^{-12} \text{ W/kg}$  en een halveringstijd van ongeveer 2,4 miljard jaar. Bereken met dit model hoeveel energie er in totaal is geproduceerd door radioactief verval in de Aarde.
- Kun je uit de bijdragen van de verschillende isotopen aan  $H(0)$  bepalen wat de concentraties van die isotopen waren?

---

## Onderzoeksdeel 3: Warmteproductie en geologische processen

De warmteproductie door radioactiviteit kan de langzame afkoeling van de Aarde verklaren. Misschien is die ook verantwoordelijk voor geologische processen zoals aardbevingen, vulkaanuitbarstingen en gebergtevorming. Is de warmteproductie daar wel groot genoeg voor?

Met (een van) de volgende opdrachten kun je onderzoeken of dat mogelijk is.

---

### Vraag 10. Gebergtevorming

Gebergtevorming vindt plaats over een tijdspanne van vele miljoenen jaren.

Kies een gebergte en maak een zo goed mogelijke schatting van de hoeveelheid energie die nodig was om dat gebergte te vormen. Is de warmteproductie in de Aarde (in dat gebied) groot genoeg?

---

### Vraag 11. Aardbevingen

Kies een historische aardbeving en zoek op wat de kracht van de beving was, hoeveel energie er ongeveer bij vrij kwam en hoe lang het ongeveer geleden was dat in dezelfde streek een aardbeving voorkwam. Bereken hiermee het vermogen dat ongeveer per vierkante meter in de tijd tussen twee aardbevingen in 'opgehoopt' moet zijn geweest en vergelijk dat met het beschikbare warmtevermogen. Je conclusie?

---

### **Vraag 12. Vulkaanuitbarsting**

---

Kies een vulkaan die min of meer regelmatig uitbarst. En voer bovenstaande opdracht nu ook voor de vulkaan uit.

NB. Het schatten van het oppervlak in dit geval is veel lastiger. Het gaat nu om het oppervlak van de zogeheten hotspot onder de vulkaan.

---

### **Afsluiting**

Maak een product waarin je je onderzoek presenteert, geheel of het meest aansprekende deel. Je kunt bijvoorbeeld denken aan een poster of een powerpoint presentatie.

Bedenk wat een toeschouwer van je presentatie ongeveer moet leren.

Vraag je toeschouwer ook om een reactie, bijvoorbeeld: wat vind je verrassende uitkomsten? Of: wat moet ik beter uitleggen?

### **Aanvullende bronnen**

Je kunt meer vinden over de 'warmtemotor van de Aarde' in de nlt-module 'Aarde in Beweging' hoofdstuk 6. Je kunt die module vinden via [www.betavak-nlt.nl](http://www.betavak-nlt.nl) → gecertificeerde modules.

## Keuzetekst

### Warmteproductie in de Aarde?

#### Een verrijkende opdracht natuurkunde 6vwo over warmteafgifte en de ouderdom van de Aarde

**Voorkennis:** Warmte; soortelijke warmte; vermogen; straling, stroming en geleiding; algemene gravitatiewet; radioactief verval

De Aarde geeft warmte af. Uit de diepe mijnbouw weten we: hoe dieper je komt, hoe hoger de temperatuur. Hoe kan dat? Werd de Aarde heet gevormd en is die nu nog steeds langzaam aan het afkoelen? Of is er iets anders aan de hand? Koelt de aardbol vanbinnen langzaam af of is er een warmtebron die de Aarde van binnen uit opwarmt? In deze verrijkingsopdracht ga je die vragen beantwoorden, onder andere door te schatten, berekeningen uit te voeren en modellen te maken.

## Colofon

De keuzeopdracht ***Warmteproductie in de Aarde?*** kan gebruikt worden voor de lessen natuurkunde in klas 6vwo. Deze opdracht is in het kader van 'differentiatie natuurkunde' met succes gebruikt in 6vwo-klassen van het Junior College Utrecht.

De keuzeopdracht is gemaakt voor het Junior College Utrecht ([www.uu.nl/jcu](http://www.uu.nl/jcu)) met bijdragen van:

- Junior College Utrecht:
  - dr. A.E. van der Valk (auteur en; eindredactie)
  - drs. F. Meijer
- Universiteit Utrecht, Faculteit Geowetenschappen
  - dr A. van den Berg

Voor deze keuzeopdracht geldt een



Creative Commons Naamsvermelding-Niet-commercieel-Gelijk delen 3.0  
Nederland Licentie

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/nl>

Het auteursrecht op de keuzeopdracht berust bij de Universiteit Utrecht, het Junior College Utrecht.

Aangepaste versies van deze keuzeopdracht mogen alleen verspreid worden indien erin vermeld wordt dat het een aangepaste versie van deze JCU-keuzeopdracht betreft, onder vermelding van de naam van de auteur van de wijzigingen.

De auteurs hebben bij de ontwikkeling van dit materiaal gebruik gemaakt van materiaal van derden. Waar dat is gebeurd, is zo veel mogelijk de bron vermeld en gaat het, tenzij anders vermeld, om een soortgelijke of ruimere licentie. Mocht er onverhoopt toch materiaal zijn opgenomen waarvan de bronvermelding of licentie niet correct zijn weergegeven, dan verzoeken we u contact op te nemen met het Junior College Utrecht.

De keuzeopdracht is met zorg samengesteld. De Universiteit Utrecht aanvaardt geen enkele aansprakelijkheid voor enige schade voortkomend uit (het gebruik van) deze keuzeopdracht.