

# KERNREAKTOREN

## een natuurlijk geologisch fenomeen

---

*Aantekeningen naar aanleiding van een lezing gehouden door Dr. N.A.I.M. Boelrijk, ZWO Laboratorium voor Isotopen Geologie, Amsterdam, op 7 november 1977 in de VU te Amsterdam in het kader van de lezingenserie, die Stichting GEA, in samenwerking met het Koninklijk Nederlands Geologisch Mijnbouwkundig Genootschap (KNGMG) het vorige seizoen heeft gegeven.*

B. van Lubeck

Bij het lezen van bovenstaande titel is het voor te stellen, dat de lezer zich enigszins verontrust voelt. Wat nu, behalve dat mensen kernreactoren bouwen, blijken deze in eens ook in de natuur te kunnen voorkomen? Weest u echter gerust; ze kwamen voor, doch kunnen nu niet meer voorkomen; we zijn te laat geboren.

### Hoe werkt een kernreaktor?

Alvorens in te gaan op het — in het verleden — voorkomen van natuurlijke kernreactoren lijkt het zinvol eerst de werking van een kernreaktor uiteen te zetten. De hoofdrolspeler in het hele drama is de uraniumisotoop uranium-235 (U-235). Het getal 235 geeft het aantal kerndeeltjes aan. In dit geval 92 protonen en 143 neutronen.

Nu zijn allerlei combinaties van aantallen protonen en neutronen in een atoom mogelijk. Bij voorbeeld het waterstofatoom bestaat slechts uit één kerndeeltje en wel 1 proton; voegen we hierbij een neutron, zodat we waterstof van 2 kerndeeltjes krijgen (in dit geval 1 proton + 1 neutron) dan krijgen we het zware waterstof (D, deuterium). Indien we het zware waterstofatoom met nog een neutron weten uit te breiden, dan ontstaat tritium (1 proton + 2 neutronen).

Het aantal combinaties, dat op deze wijze gemaakt kan worden en stabiele isotopen oplevert, is tegen de 300 en onder te verdelen in 92 verschillende — min of meer stabiele — elementen, waarbij het uranium de laatste in de rij is.

Vangt uranium-235 een neutron, dan ontstaat er een instabiele toestand waarbij het uraniumatoom te veel energie krijgt, gaat trillen en splijt. Daarbij wordt één licht en één zwaar deel gevormd, bijv. strontium met 38 protonen en xenon met 54 protonen. Naast deze splijtingsproducten komen ongeveer 3 neutronen vrij (gemiddeld 2,7 per splijting).

In het ideale geval kan elk van de drie neutronen door een uraniumatoom worden ingevangen en opnieuw tot splijting aanleiding geven, waarbij steeds gemiddeld 2,7 neutronen vrijkomen. Deze reactie gaat erg snel en kan als kettingreactie volkomen uit de hand lopen tot een gigantische ontploffing. Door het grote aantal uraniumatomen, dat aan deze kettingreactie deelneemt, is de vrijkomende hoeveelheid energie enorm. Nu zal niet elk vrijkomend neutron tot nieuwe splijting aanleiding kunnen geven, omdat slechts neutronen met beperkte snelheid door U-235 gevangen kunnen worden. Is de snelheid te hoog, dan verlaat het neutron het U-235 zonder meer. Dit is een probleem waarmee we in kernreactoren te maken krijgen. We

moeten zorgen voor voldoende afremming van de vrijkomende neutronen. Het reaktorgedeelte waarin dit geschiedt is de zgn. moderator. Een moderator bestaat uit grafietblokken met daarin gaten, waarin uraniumstaven worden gestoken. Vindt er nu splijting plaats, waarbij neutronen vrijkomen, dan worden die in de grafiet afgeremd en kunnen in een andere uraniumstaaf opnieuw splijting veroorzaken.

Speelt dit proces zich dan niet in uranium af? Inderdaad botsen de neutronen wel met andere uraniumkernen, maar het effect is weinig efficiënt. Het volgende voorbeeld moge dit verduidelijken.

Stel we stuiten een rubber balletje tegen een muur. Het balletje zal nu met grote snelheid van de muur teruggekaatst worden. De massa's van balletje en muur zijn erg ongelijk. Stoten we daarentegen twee biljartballen tegen elkaar, dan verliest de stotende bal duidelijk aan snelheid bij het in beweging brengen van de andere bal. In dit geval zijn de massa's van de beide lichamen gelijk.

Met andere woorden: als we neutronen kunnen laten botsen met deeltjes van gelijke massa, bijvoorbeeld met een waterstofkern die slechts uit één proton bestaat dan is de afremming heel effectief.

In de praktijk gebeurt dat dan ook. Overigens zijn er nog andere stoffen die in aanmerking komen als moderator op te treden, bijv. het hierboven genoemde deuterium (proton + neutron), het zware waterstof. Vele lichte kernen in het periodiek systeem der elementen bezitten echter de vervelende eigenschap dat ze de gebotste neutronen kunnen invangen, waarbij we aldus het neutron helemaal kwijt raken. De eerstvolgende die neutronen niet invangt doch ze slechts afremt is grafiet. Als moderator in een kernreaktor wordt dus gebruikt: water, zwaar water en grafiet.

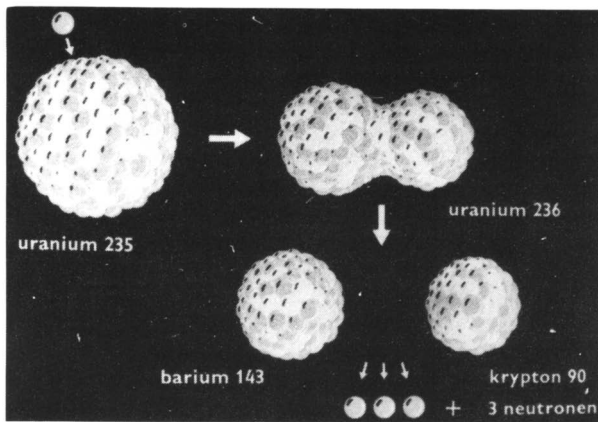
Dan de kettingreactie. Hoe kunnen we die in de hand houden? We zullen een aantal van de bij elke splijting vrijkomende neutronen moeten invangen. Heel geschikte elementen hiervoor zijn borium en cadmium, waarvan staven in de reaktor worden geplaatst, die door op en neer te bewegen een kleiner of groter deel van de neutronen wegvangen, zodat het vermogen van de reaktor kan worden verhoogd of verlaagd.

### De natuurlijke kernreaktor, waaraan te voldoen?

Als we in de natuur een kernreaktor willen vinden, dan moet aan de volgende drie voorwaarden worden voldaan:

- a) er moet een voldoende hoeveelheid splijtstof aanwezig zijn,
- b) er moet een moderator aanwezig zijn en
- c) er zal op een of andere wijze een mechanisme gevonden dienen te worden waarmee de reaktor zijn kernreactie in de hand kan houden.

Dan is er de komplikatie waardoor het nu niet meer mogelijk is een kernreaktor in de natuur aan te treffen en vroeger wél. De oorzaak hiervan is de volgende: het natuurlijk



Afb. A

*Bij de splijting van de uraniumkern treft een neutron een kern van het uraniumisotoop-235. De primair ontstane kern van uranium-236 is niet stabiel, hij valt uiteen in twee – in het algemeen niet gelijke – brokstukken (hier in een barium- en een kryptonkern) en meerdere neutronen.*

*Deze splijtingsneutronen kunnen verdere splijtingsprocessen op gang brengen.*

*Bij iedere splijting komt energie vrij in de kernreactor in de vorm van warmte.*

uranium komt in twee isotopen voor, te weten het uranium-238 en het uranium-235. Deze uranium-isotopen hebben hetzelfde aantal protonen in de kern (92), maar U-238 heeft drie neutronen méér in de kern dan U-235. Op het eerste gezicht zou te verwachten zijn dat U-238 (dus met drie neutronen méér) veel beter kernsplijtingen en kernreacties kan veroorzaken. Dat is echter niet het geval. Het uranium-238 kan veel minder gemakkelijk worden gespleten en heeft ook een veel langere halveringstijd dan uranium-235, zoals we later zullen zien. Tegenwoordig bevat het natuurlijke uranium te weinig U-235 om een reactie op gang te houden onder natuurlijke omstandigheden. Met gewoon water als moderator lukt dit ook technisch niet, terwijl dit met zwaar water wel mogelijk is. Het verschil tussen de twee moderatoren is, dat gewone waterstof ook enigszins in staat is neutronen in te vangen. Anders gezegd: bij zwaar water als moderator zullen er minder neutronen verdwijnen.

In Canada zijn kernreactoren gebouwd die als splijtstof het uranium gebruiken in de isotopische verhouding zoals die nu in de natuur voorkomt, met zwaar water als moderator. Zouden we dus een reaktor bouwen met gewoon water als moderator, dan moet de splijtstof meer U-235 bevatten dan nú in de natuur wordt aangetroffen.

## De halveringstijd

In het kader van dit artikel is het niet overbodig het begrip "halveringstijd" nog eens te behandelen. Uranium zendt per tijdseenheid een zgn. alfadeeltje uit, een combinatie van 2 protonen en 2 neutronen. Het uraniumatoom houdt door die straling op uranium te zijn. Dit radio-actieve proces verloopt volgens een kans- of toevalswet zodanig, dat per bepaalde tijdeenheid een bepaald percentage van een isotoop is verdwenen. Er zal dus een moment komen waarop de helft van het eerst aanwezige isotoop is overgebleven. De tijd die dan is ver-

lopen noemen we de halveringstijd. De halveringstijd is een konstante voor een bepaald isotoop en is voor verschillende isotopen verschillend. Het radio-actieve verval vindt plaats zowel in U-238 als in U-235.

Het is al gezegd: U-235 is minder stabiel dan U-238; de kans nl. dat U-235 een alfadeeltje uitzendt is veel groter dan bij de andere isotoop U-238.

Dit verschil wordt uitgedrukt in de halveringstijd, die voor U-235 700 miljoen jaar bedraagt en voor U-238 4.500 miljoen jaar, een tijd die bijna overeenkomt met de ouderdom van de aarde. Hieruit volgt dus, dat bij het ontstaan van de aarde ongeveer de dubbele hoeveelheid U-238 aanwezig was. Van U-235 (halveringstijd 700 miljoen jaar) was bij het ontstaan van de aarde meer dan  $26=64$  maal zoveel aanwezig als nu nog het geval is.

Hieruit volgt, dat in de geologische geschiedenis van de aarde de uranium-isotoopverhouding voortdurend gewijzigd is tengevolge van het verschil in halveringstijd tussen beide isotopen. Het uranium is verarmd. Het percentage U-235 in verhouding tot U-238 was in het verleden veel groter dan nu het geval is.

Deze situatie maakt het waarschijnlijk dat er eens een moment is geweest waarbij de verhouding van de beide uranium-isotopen zó gunstig was dat, met behulp van water als moderator, een natuurlijke kernreactor zou kunnen ontstaan. Men denkt zelfs dat 1% U-235 voldoende is – en dat betekent dat nog 400 miljoen jaar geleden, als alles mee zat (of juist tegen, afhankelijk van hoe we een en ander beoordelen) – een kernreactor kon ontstaan.

## De ontdekking van een natuurlijke reaktor

Reeds in 1956 had men het idee geopperd van het in het verleden voorkomen van een natuurlijke kernreactor. Alle nasporingen bleven echter zonder succes. Een gebeurtenis in de verrijningsfabriek te Pierrelatte in Frankrijk in het jaar 1972 was de aanleiding tot de ontdekking van een natuurlijke kernreactor.

Wat was hier aan de hand? Bij routine-analyses, verricht aan een bepaalde partij verrijkt uranium, bleek de verhouding tussen de beide uranium-isotopen U-235 en U-238 steeds een te lage waarde te geven. Wat was er fout aan de analysetechniek? Steeds opnieuw vond de analist te lage waarde. Alles wees er op dat voor het verrijningsproces van verarmd uranium was uitgegaan.

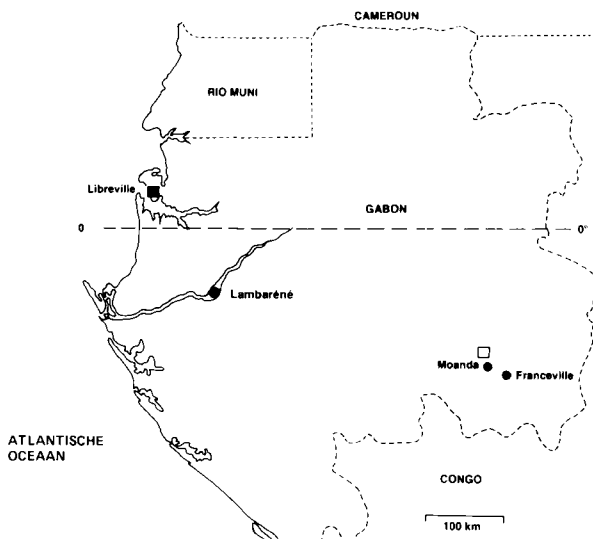
Ter verduidelijking: alles wees er op dat het uranium vóór de verrijking reeds armer was aan U-235 dan nu overal op aarde werd gevonden. Maar dat betekende dat eens ergens op aarde (de vindplaats van het uraniumerts!) een kernreactor moest hebben gewerkt, en om dat uit te zoeken bleek geen sinecure! Doch het geluk was met de onderzoeker. Omdat van alle verwerkte uraniumertsen in de verrijningsfabriek te Pierrelatte monsters werden bewaard leidde het spoor al snel naar Gabon in Afrika. Zelfs niet alleen de uraniummijn in Oklo maar ook de plaats in de mijn vanwaar het erts afkomstig was kon exact gelokaliseerd worden, terwijl achteraf nog een aantal andere reaktiehaarden is opgespoord in dezelfde mijn.

## Hoe kon een kernreactor in de natuur ontstaan?

Wat was daarvoor nodig? De splijtstof, de brandstof. Hoe moeten we ons voorstellen dat de natuur in staat was voldoende splijtstof, plus een geschikte moderator, op die plaats in de uraniummijn te Oklo bij elkaar te krijgen? Gemiddeld komt in natuurlijk gesteente uranium voor in

de verhouding van 1 tot 3 p.p.m. (parts per million), dus één tot drie delen op elke miljoen delen gesteente. In procenten uitgedrukt bevat gesteente dus 0,0001 à 0,0003% uranium.

Een beetje behoorlijke kernreactor vraagt wel een "iets" hogere concentratie, zo ongeveer in de orde van grootte van 20%. Voorwaarde is dus dat ertsafzettingen met minstens 20% uranium ontstaan zijn. Nu zijn er sterke aanwijzingen dat de uraniumafzettingen in Oklo als volgt konden plaatsvinden.



## Verwerking als oorzaak van concentratie

De concentratie van uranium vindt zijn oorzaak in de beweeglijkheid van het element. Uraanverbindingen zijn onder bepaalde omstandigheden goed oplosbaar in water; slechts geringe veranderingen in het milieu hebben neerslag van uraanverbindingen tot gevolg. Als 4-waardig uranium is het onoplosbaar; als 6-waardig voorkomen lost het zeer goed in water op, waardoor het gemakkelijk getransporteerd kan worden.

In het gebied van Oklo is aangetoond, dat tijdens de uraniumafzetting een stroomgebied en delta van een rivier bestonden uit het type zandige sedimenten.

De periode waarover we nu praten is het Precambrium en wel zo'n 1800 miljoen jaar geleden. Aangezien er toen weinig leven was, nemen we aan dat het uranium zich in een reducerend milieu bevond, voorkwam in de vierwaardige toestand, en als onoplosbare verbinding in het stroomgebied van de rivier neersloeg. Na verloop van tijd trad oxydatie op (mogelijk onder invloed van primitieve algengroei), de uraanverbinding wordt nu oplosbaar en getransporteerd naar het mondingsgebied van de rivier. Bovenop dit zandige sediment zet de zee klei af. Op dit grensvlak zijn scherpe afwisselingen van riviersedimenten en mariene kleiige afzettingen met veel organisch materiaal, dat heeft bijgedragen tot reductie van het hier neerslag uranium. Tegenwoordig ligt dit sedimentatiegebied ongeveer 45° hellend opgestuwd tegen een granietwand.

We gaan nog even 1800 miljoen jaar terug in de tijd. Tengevolge van tektonische bewegingen ontstaan er lenzen van klei. Aanvankelijk waren deze lenzen weinig doorlaatbaar voor water, doch onder invloed van lokale bewegingen en spanningen ontstaan in deze kleilenzen barsten en scheuren. Hierin nu laat het cirkulerende grondwater ge-

koncentreerde uraniumafzettingen achter, concentraties van zelfs meer dan 20%! Scherpe overgangen naar buiten zijn aangetoond waarin de uraniumafzetting minder sterk gekoncentreerd is. Na intensieve bestudering van de uraniummijn Oklo kwam vast te staan dat er zeker zes zônes aan te wijzen zijn waar natuurlijke kernreactoren hebben gewerkt.

## De reaktor-zône

Er zijn enkele voorwaarden te stellen waaraan de reaktor-zône moet voldoen:

- De uraanconcentratie moet voldoende hoog zijn, tenminste enkele tientallen procenten.
- De dikte van de afzetting mag niet te klein zijn, want anders ontwijken teveel neutronen in de omgeving, voor zij voldoende zijn afgeremd, en een nieuwe splijting veroorzaken.
- Er moet een moderator aanwezig zijn; nu, die was er, en wel in de vorm van water.
- Er mogen niet te veel giften aanwezig zijn.

Dit laatste punt vraagt enige toelichting.

Indien te veel giften aanwezig zijn in de vorm van neutronenvangers, waarvan vanadium er één is, dan gaat de kernreactie nog mis, zelfs als de uraniumconcentratie hoog genoeg is. Dit is het geval bij andere afzettingen in dit gebied, waar minstens zo hoge concentraties zijn, waar zeker voldoende water was, maar waar een te groot aantal giften de neutronen weg ving.

Hier is nooit een kernreactie ontstaan.

Er is nog een opmerkelijk feit waaraan even aandacht moet worden besteed.

Tot nu toe zijn nergens op aarde uraniumafzettingen gevonden die ouder dan 2 miljard jaar zijn. Een veronderstelling is dat elke uraniumafzetting ouder dan genoemde periode een dusdanig grote hoeveelheid U-235 bevatte, dat spontane kettingsreacties de zaak hebben opgeblazen. Deze hypothese wordt voor een deel bevestigd door de vondst van de resten van de Oklo-reaktor.

In Oklo is de zaak dus niet opgeblazen. Omdat er enerzijds niet voldoende giften waren, anderzijds dus laagdikte en uraniumconcentratie en geschikte moderator regelend gewerkt hebben. Wel kan de reaktie aflopen tengevolge van het stijgen van de watertemperatuur, omdat bij het bereiken van een kritische waarde het water in het gesteente wordt weggeperst. De reaktie loopt dan dood omdat er onvoldoende waterstofatomen overblijven om de neutronen af te remmen.

## Tijdsduur en vermogen van de reaktor in Oklo

De totaal ontwikkelde hoeveelheid energie die de natuurlijke kernreactor in Oklo heeft opgeleverd kan worden berekend, omdat achteraf meetbaar is hoeveel U-235 is verdwenen, waardoor het aantal splijtingen kan worden bepaald. Een schatting van het vermogen van de reaktor (energieproductie per tijdseenheid) kan als volgt worden verkregen.

Tijdens de reaktie moet de geproduceerde warmte worden afgevoerd door geleiding, zodat de warmtegeleidingscoëfficiënt van het omringende gesteente, en het verschil in temperatuur tussen reaktorhaard en verre omgeving beperkende factoren zijn. De temperatuur van de haard kon niet veel hoger worden dan 350°C, omdat bij hogere temperatuur het water zou zijn verdampt en weggeperst in het omringende gesteente. Daarmee zou de moderator zijn

verdwenen en zou de reactie zijn gestopt en de warmte-ontwikkeling beëindigd. Aangezien de natuurlijke temperatuur van het gesteente op de diepte van de reaktor nauwelijks lager dan 50 °C kon zijn, hebben we hiermee een redelijk nauwkeurig inzicht in het temperatuursverloop van het hele gebeuren. Dit geheel overwegende kunnen we konkluderen dat nauwelijks meer warmte afgevoerd kon worden dan enkele tientallen kiloWatts.

Hoeveel energie is in de loop van de tijd geproduceerd? De schatting hiervoor bedraagt 10 gigaWattjaar (= 10 miljard KWh), een aardige hoeveelheid. We weten nu hoeveel energie er totaal geproduceerd is; ook weten we nu hoeveel het maximale vermogen is. Een eenvoudig rekensommetje leert ons dat de konklusie moet luiden dat de natuurlijke kernreaktor in Oklo ongeveer 1 miljoen jaar gewerkt heeft.

Andere schattingen spreken evenwel van ruim 600.000 jaar. Het is de vraag welke cijfers juist zijn; in elk geval geven zij een indicatie in welke grootteorde we moeten denken.

Ook het tijdstip van de reactie is niet exakt bekend. Granietmassa's die in dezelfde streek voorkomen hebben een ouderdom van ruim 3 miljard jaar. Ouderdomsbepalingen aan glimmers in hetzelfde gebied wijzen op een temperatuursstijging 1800 miljoen jaar geleden, waarbij metamorfose is opgetreden. Om misverstanden te voorkomen: de temperatuursstijging is niet veroorzaakt door de reaktor. Ouderdomsbepalingen aan materiaal uit de reaktor, volgens de looduranium methode, wijzen op een ouderdom van 1800 miljoen jaar. Hoewel uit geen van de bekende gegevens met zekerheid afgeleid kan worden wanneer de reaktor actief is geweest, lijkt 1800 miljoen jaar geleden een goede benadering, als men daarbij bedenkt, dat de onzekerheid in dit getal 100 miljoen jaar kan zijn.

## Splijtingsprodukten

Waar nog niet naar gekeken is, maar wat toch een duidelijk bewijs van een kernreactie is geweest, is het voorkomen van de splijtingsprodukten die er nu nog zijn. Alles ligt nog keurig op zijn plaats, het grondwater (gehinderd in zijn stroming) heeft weinig materiaal getransporteerd. Moderne onderzoekstechnieken maken studies op mikroschaal mogelijk, zodat precies kan worden vastgesteld wat zich in een korrel gesteente aan splijtingsprodukten bevindt. Het blijkt, dat veel van de splijtingsprodukten nog geheel op hun plaats zitten, daar waar ze zijn ontstaan. Slechts enkele elementen zijn getransporteerd. De splijtingsprodukten die nog aanwezig zijn: o.a. plantanium, cerium, neodymium, europium, zirkonium, enz. ondersteunen het bewijs. Voor een deel verdwenen zijn: palladium, rubidium, cerium, strontium, cadmium.

Aan de hand van enkele van deze splijtingsprodukten is nog het nodige te weten te komen over de reactie.

## Neodymium (Nd)

Natuurlijk voorkomend neodymium treffen we met een groot aantal isotopen aan. De massagetallen zijn 142, 143, 145, 146 en 148. Het in een kernreaktor als splijtingsprodukt ontstane neodymium heeft een heel andere isotopische samenstelling: Nd-142 ontbreekt geheel, Nd-143 komt in groter percentage voor, terwijl neodymium met massagetal 144 juist minder voorkomt, enz.

Dit gegeven geeft ons de mogelijkheid meer gegevens over de Oklo-reaktor te verkrijgen, want de mate waarin Nd-142 wordt aangetroffen zou een aanwijzing voor de verhouding tussen natuurlijk neodymium en neodymium als splijtingsprodukt van de Oklo-reaktor kunnen zijn. Helaas, zo eenvoudig is het echter niet. Er zit een addertje onder het gras.

Het blijkt namelijk dat er meer van de 144-isotoop is dan verwacht zou worden.

Want wat gebeurde er? Het in de Oklo-reaktor ontstane Nd-143 bleef onderhevig aan een neutronenbombarde-ment en reageerde met neutronen tot de isotoop Nd-144. En hierin schuilt de oplossing voor het raadsel, er wordt minder Nd-143 aangetroffen en méér Nd-144. Hetzelfde geldt voor de neodymium-isotopen 145 en 146.

De mate van verschuiving in deze isotoopverhoudingen geeft dan een aanwijzing voor de hoeveelheid neutronen, waarmee neodymium in de reaktor is gebombardeerd. Tegelijkertijd verkrijgen we hiermee een inzicht in de totale hoeveelheid vrijgekomen neutronen.

## Het raadsel van U-235

Ook aan de hand van de verdwenen hoeveelheid U-235 menen we te weten te kunnen komen hoe groot het aantal neutronen is geweest dat door die massa is gegaan. Helaas blijkt ook nu iets niet te kloppen. Afgaande op het splijtingsprodukt neodymium vinden we 1,5 maal zo veel neutronen per oppervlakte-eenheid als berekend naar het verdwenen U-235.

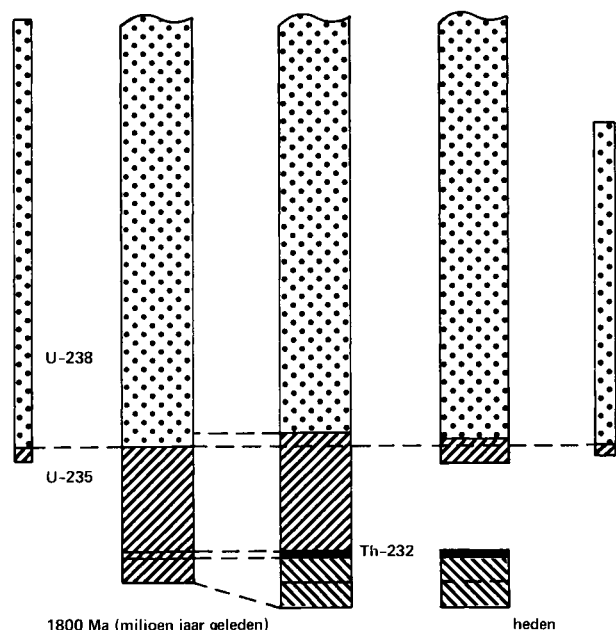
Afb. B

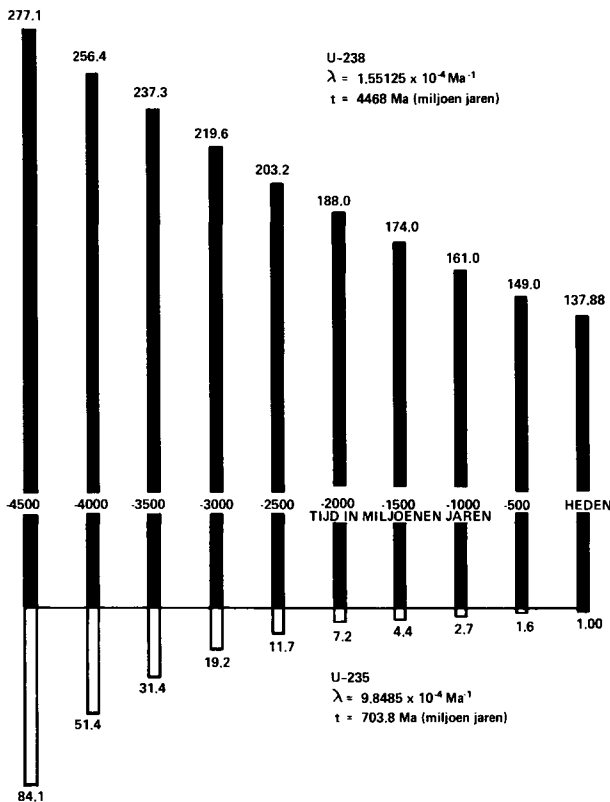
Staafdiagram van de verandering in het uranium in een reaktiehaard te Oklo.

Linkerstaaf: verhouding tussen U-235 en U-238 voor het begin van de reactie, ongeveer 1800 miljoen jaar geleden.

Staaf 2: vergroting van het onderste deel van staaf 1. Staaf 3: tijdens de reactie is een deel van U-238 omgezet in U-235; een deel van U-235 is omgezet in Th-232, en een ander deel in gelijke aantallen lichte en zware splijtingsprodukten.

Staaf 4 en 5: tegenwoordige toestand in de reaktiehaard; staaf 4 is weer een vergroting van het onderste deel van staaf 5.





Afb. C

Staafdiagram van de verandering in de hoeveelheid en verhouding van U-235 en U-238 tijdens de geschiedenis van de aarde.

Rechterstaaf: tegenwoordige samenstelling; hoeveelheid U-235 als eenheid; er zijn 137,88 keer zoveel atomen U-238.

De andere staven geven de hoeveelheden U-235 en U-238 in het verleden aan. In 4500 miljoen jaar is de hoeveelheid U-238 door normaal radioactief verval veranderd van 277,1 eenheden tot 137,88 eenheden, dus ongeveer gehalveerd. In diezelfde tijd is de hoeveelheid U-235 geslonken van 84,1 eenheden tot één. ( $\lambda$  is het symbool voor de vervalsconstante,  $t_{1/2}$  voor de halveringstijd).

## Tot slot enkele cijfers over de Oklo-reaktor

Vermeldenswaard is dat 93% van de splijting afkomstig is van U-235, de rest van U-238 en Pu-239. De totale hoeveelheid U-235 die is verspleten was aanvankelijk geschat op ca. 4000 kg, maar bleek in werkelijkheid ca. 6600 kg te zijn geweest.

De reaktieduur moet hebben gelegen tussen 540.000 en 640.000 jaar en heeft ongeveer 1800 miljoen jaar geleden plaatsgevonden, cijfers die aardig in de buurt komen van eerder genoemde waarden.

Bij het begin van de kernreaktor was ca. 30.000 kg U-235 aanwezig, waarvan dus ca. 6600 kg verspleten is, terwijl ca. 2600 kg U-235 is teruggevormd door conversie via plutonium (nl. de reactie van U-238 met neutronen over neptunium naar plutonium).

Rekening houdend met de halveringstijden van de beide uranium-isotopen is van de destijds aanwezige hoeveelheid U-238 (geschat op 1035 ton) nu nog 80% over. Van U-235, met een halveringstijd van "slechts" 700 miljoen jaar is nu nog 4800 kg in Oklo overgebleven.

Volledigheidshalve dient nog te worden opgemerkt dat ca. 15% van het uranium-235 niet splijt bij een neutronenbombardement, maar overgaat in de isotoop U-236 die heel geleidelijk overgaat in thorium-232.

Zo zijn er vele komplikaties waarmee rekening gehouden dient te worden.

Verheugend echter is het feit dat het fenomeen van de natuurlijke kernreaktor te Oklo in Gabon zo goed is gekonserveerd en bewaard gebleven, zodat voortdurend studies gemaakt kunnen worden van dit interessante proces.

### Literatuur:

Prof. Dr. J.A. Goedkoop, *Het Oklo-fenomeen* – Natuur en Techniek, 1976.

George A. Corvan, *A natural fusion reactor* – Scientific American, 1976

De schuldige voor deze afwijking blijkt U-238 te zijn die door het invangen van een neutron van zeer bepaalde snelheid reageert, waarna neptunium-239 ontstaat.

Door radio-actief verval gaat neptunium over in plutonium-239.

Dus uit uranium-238 kan plutonium-239 gevormd worden, dat, met een halveringstijd van 1.825.000 jaar niet zo'n erg lang leven beschoren is. Tot onze verbazing zien we nu dat plutonium relatief vrij snel overgaat in U-235. Langs deze omweg is dus U-235 teruggevormd.

Dit verklaart ook waarom onze schatting van de hoeveelheid energie die is ontwikkeld van de neutronenstroom per bepaald oppervlak, berekend aan de hand van het verdwenen uranium-235, niet klopt met de waarde die we bij neodymium vonden. Het neodymium is keurig bewaard gebleven, terwijl U-235 achteraf voor een deel is teruggevormd en wel ruim één derde van wat er destijds is verdwenen.

