

Kijken in het verre verleden met neutronen uit de Delftse kernreactor

Cheops gebombardeerd met

(FOTO: ALFRED MOLON, UNTERHACHING)

Panorama van de piramides van Gizeh, gebouwd rond 2600 jaar v.Chr.

ASTRID VAN DE GRAAF

Het blijft een wonder hoe de Egyptenaren in een periode van twintig jaar een piramide van 7 miljoen ton uit de grond wisten te stampen.

De discussie over de bouwtechniek van de piramides bij Gizeh in Egypte laait dan ook nog regelmatig fel op. Want hoe hak je stenen zonder geschikte beitels? Hoe sleep je 2,5 miljoen loodzware steenblokken tot honderdveertig meter omhoog? Of deden ze het toch anders? Waren de Egyptenaren vroeger briljante ingenieurs die verbrokkeld zandsteen en cement in mallen tot blokken goten? Gehakt of gegoten? Dat is de vraag waar dr. Menno Blaauw, hoofd Facilities & Services van het Reactor Instituut Delft, de allernieuwste analysetechnieken op losliet.



Piramides zijn opgebouwd uit blokken van kalksteen die in gewicht variëren van 3 tot 30 ton. De grote piramide van Gizeh is 140 meter hoog.



(FOTO: INSTITUT GÉOLOGIQUE, PARIS)

De Franse hoogleraar Joseph Davidovits is ervan overtuigd dat de piramides gemaakt zijn van gegoten stenen, zoals betonblokken werden gestort.

neutronen

Zes jaar geleden kreeg Menno Blaauw een stukje steen uit de piramide van Cheops uit de erfenis van zijn vader. Op dat moment werkte hij nog als onderzoeker aan neutronenverstrooiing bij het Interfacultair Reactor Instituut (IRI) van de TU Delft. Het was op zich geen verrassing want in 1995 was hij samen met zijn vader naar Egypte geweest. Blaauw senior, een chemicus, was na zijn pensioen gefascineerd geraakt in de Egyptologie.

“Hij voelde dat het einde begon te naderen en de Egyptische cultuur is erg gericht op het dodenrijk. Het was voor hem vooral een manier om er mee om te gaan,” vertelt Blaauw. “Omdat hij er al een aantal malen was geweest, leidde hij mij zelf rond langs de interessantste plekken.”

Zo lukte het ook de koninginnekamer in de piramide van Cheops te bezoeken, die spaarzaam opengesteld wordt voor publiek. In die kamer is Blaauw senior, nieuwsgierig als een eeuwige onderzoeker, in een scheur achterin een nis gekropen. Zo hoog en ver als maar kon reiken, heeft hij een stuk steen losgewrikt en in zijn zak gestoken.

“Voor de zekerheid heeft hij het in zijn broekzak door de douane geloodst. Koffers worden gescand op artefacten,” zegt Blaauw enigszins schuldbevestigend.

Onverklaarbaar Aangestoken door de fascinatie van zijn vader is ook Blaauw zich gaan interesseren voor de raadsels van de piramides.

“Ze hadden zo’n 2500 jaar voor Christus geen beitels die harder waren dan steen. Met koper kan je geen zandsteen uithakken of zagen. Hoe kan je steenblokken dan zo secuur hakken? Zandsteen is relatief bros gesteente. Er zitten ook breuk-



Dr. Oebele Blaauw met zijn vaste taxichauffeur. Op de achtergrond de Cheops-piramide waarvan de top nog deels is bekleed met albast.



Het monster dat dr. Oebele Blaauw uit de scheur in de nis in de Koninginnekamer van de piramide van Cheops heeft genomen.



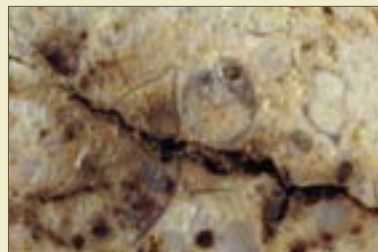
Doorsnede van het kalksteen Cheops monster dat werd gebruikt voor proeven met elektronenmicroscopie en de zogenoemde thin section-techniek.



Close-up van de piramidesteen waarbij de fossielen goed zichtbaar zijn.



Verder ingezoomd op het snijvlak blijken er verschillende kleine holtes te zijn. Die geven de indruk dat de steen inderdaad gegoten zou kunnen zijn, omdat tijdens zo'n proces makkelijk luchtbellen ingesloten worden.

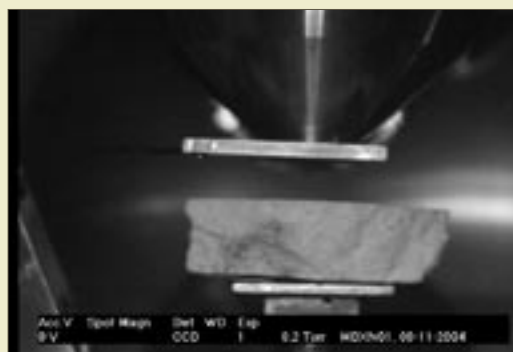


Scheur die een fossiel door midden deelt en doet denken aan krimp.

Door twee polaroid-filters ten opzichte van elkaar in kruisstand te zetten (in de zogenoemde thin-section-techniek) worden de optisch actieve mineralen zichtbaar gemaakt. In overstemming met de theorie van prof. J. Davodovits, die stelt dat een natuurlijk sedimentiegesteente een gelaagde structuur moet vertonen, is er geen gelaagde structuur te zien.



In het Microlab van de faculteit Civiele Techniek is Cheops steen met hun ESEM (environmental scanning electron microscope) gescand op de elementen samenstelling. Bijzonder aan dit apparaat is dat het de samenstelling zeer lokaal kan meten van elk gewenst stukje oppervlak.



lijnen in. Om een groot massief blok over te houden, maak je evenveel puin. Die bergen puin zijn nooit gevonden.”

De steengroeven overigens wel. Op basis van sporenelementenanalyse zijn in ieder geval tien steengroeven verdeeld over heel Egypte getraceerd als leverancier. Behalve het uithakken en stapelen is ook het vervoer van 3.000 tot 30.000 kilo wegende blokken over rondrollende boomstammen een gigantische logistieke operatie geweest. Zo zijn de piramides omgeven door onopgeloste raadsels.

De Blaauws hebben er ook rekensommen over gevonden. Een mens kan een bepaald vermogen leveren om een steen een helling op te slepen. Het is bekend dat piramides in zo'n 20 jaar werden gebouwd. Zodra de nieuwe farao aantrad, startte de bouw want als hij stierf moest het klaar zijn. Dat betekent dat 250.000 man dag in dag uit bezig zijn met stenen slepen.

“Dit levert een bouwplaats met de omvang van de stad Utrecht, en dan hebben we het alleen over de sleepmannen en nog niet over alle activiteiten eromheen. Het is nauwelijks voor te stellen,” aldus Blaauw junior.

Gietsteen In zijn onverzadigbare behoefte aan kennis over de piramides kwam Blaauw senior een boek van de Franse geochemicus Joseph Davidovits tegen. Deze wetenschapper vindt dat de theorie van uitgehakte steenblokken die via hellingen omhoog werden geslept, aan alle kanten kraakt. Hij stelt dat de enorme piramidestenen kunstmatig zijn gemaakt door kalksteengranulaat in mallen te storten en te laten uitharden op de manier zoals we nu beton maken.

De steengiettheorie klonk Menno Blaauw plausibel in de oren: “Dit is praktisch beter voor te stellen. Kalksteen bestaat voornamelijk uit calciumcarbonaat. Een perfecte grondstof voor cement. Een deel van de gewonnen kalksteen laat je in korrelvorm, het andere deel sla je tot poeder, stook je op en meng je met water. Volgens Davidovits moet de piramide als geheel 15% water bevatten. Het echte recept voor kunststeen houdt Davidovits overigens geheim. Hij heeft patent op het zogenoemde geopolymeer. Na een tijd heb je kunststeen dat niet van echt is te onderscheiden. Het sporenelementenpatroon verandert door de behandeling niet. Met een enkele test is dan ook niet vast te stellen of je met kunststeen te maken hebt of niet. Op het moment dat de gangbare hypothese over de bouw van de piramide geformuleerd werd, zo eind 19e eeuw, was beton nog niet gebruikelijk als constructiemateriaal. Het is dus niet vreemd dat de archeologen niet op die manier er naar keken. Nu kunnen we met een andere bril kijken. Misschien hebben we iets over het hoofd gezien,” vindt Blaauw. Zijn nieuwe functie als hoofd Facilities & Services van het Reactor Instituut Delft (sinds 1 januari 2005 de nieuwe naam voor de facilitaire helft van het IRI) bracht hem op het idee om zijn verworven steen nader te onderzoeken.

Zoeken naar water Een van die andere brillen om naar de samenstelling van de Cheopssteen te kijken heeft Blaauw in het RID staan. Het is een neutronenverstrooier: de roterende kristalspectrometer (RKS). Hiermee kan hij bekijken of bijvoorbeeld cementsteen water bevat. Het uitharden van beton vindt plaats door een langzame chemische reactie met water die ervoor zorgt dat het cement verandert in steenachtige vaste stof. In beton zit dus kristalwater dat stevig via waterstofbruggen aan het cement verbonden is. Zoals Mars afgezocht wordt naar water voor tekenen van leven, zo zocht Blaauw met zijn neutronenverstrooier naar tekenen van ingenieurschap in het tijdperk van de Farao's.

Neutronen zijn ongeladen deeltjes met dezelfde massa als een waterstofkern. Schiet je een neutron frontaal tegen een waterstofkern dan kan het daardoor zijn kinetische energie geheel overdragen. Bij een botsing tussen het neutron en een watermolecuul daarentegen absorbeert dit molecuul alleen porties energie van een bepaalde grootte, die overeenkomt met de vibratiefrequenties van het molecuul. Het grootste deel van de porties zal 70 meV bedragen. Wanneer het energieverschil tussen de ingeschoten en gereflecteerde neutronen geen piek vertoont in het gebied van 70 meV, dan bevinden zich vrijwel zeker geen watermoleculen in de steen.

Blaauw: “Aan cement is op deze manier al vaak gemeten. We hebben dus kennis genoeg over deze metingen. Maar na een week meten was er nog geen teken van water. Nu is dit natuurlijk geen sluitend bewijs. Het is slechts een indicatie dat het Cheops monster niet gemaakt is met waterbindend cement zoals wij dat kennen. Als er water in zit, zit het wel heel erg stevig vast.”

Poriestructuren Cement wordt meestal aangemaakt met een geringe overmaat aan water, zodat het beter is te storten en te smeren. Daarna verdampt het water waardoor er een specifieke poriestructuur achterblijft. Een zeer ingenieuze methode die dergelijke poriestructuren van 30 nanometer tot 10 micrometer kan meten, is de zogenoemde kleine hoekverstrooiing. In Delft gaat het om precies te zijn om de spin-echo-variant daarvan. Het kan de grootte en de ordening van de poriën meten.

Blaauw: "Dit apparaat is het geesteskind van dr. Theo Rekveldt, van de toenmalige afdeling Neutronen en Mössbauer Spectrometrie. Hoe kleiner de hoek waarin deze apparaten kunnen kijken, hoe groter de "brokken" en de structuren die je kunt zien. Onze kleine hoekverstrooiingsopstelling is de enige in de wereld die aan structuren van 10 micron en kleiner kan meten. De standaard apparaten komen niet verder dan een tiende micron. Met onze spin-echo-techniek kunnen we bovendien 10.000 keer sneller meten, dus een meting van een dag wordt teruggebracht tot 10 seconden."

Onze spin-echo werkt net als de roterende kristalspectrometer met neutronen, alleen net even anders. Het gebruikt niet alleen de botsingseigenschappen van de deeltjes maar ook de eigenschap dat neutronen zich in een magnetisch veld gedragen als kompasnaaldjes. Neutronen hebben geen elektrische lading maar wel een magnetisch moment, ofwel een spin. Wanneer neutronen uit de kernreactor vliegen, staan hun spins in allerlei verschillende richtingen. Met een polarisator krijgen alle neutronen dezelfde spinrichting. De stand daarvan wordt door vier even sterke magneetvelden beïnvloed. In Rekveldts kleine verstrooiingshoekmeter wordt op deze manier verstrooiing vertaald naar depolarisatie, die zich heel makkelijk laat detecteren.

Voor het beoordelen van de poriestructuur van de Cheopssteen heeft de groep van prof.dr.ir. Klaas van Breugel van de faculteit Civiele Techniek en Geowetenschappen twee referentie cementsoorten aangeleverd: portlandcement en hoogovencement. De metingen zijn zeer goed gelukt, vindt Blaauw. Alleen de verdeling van de poriegrootte in het piramidestukje leek niet op de twee andere moderne cementsoorten. Maar Blaauw heeft nog meer trucs met neutronen.

Sporenelementen Neutronen kunnen reacties veroorzaken waarbij de getroffen atoomkernen instabiel worden. De radioactieve kernen die hierbij ontstaan, geven voor elk element een specifiek patroon.

"Door een monster met neutronen te 'activeren', wordt bijna alles radioactief en kan je met een hogeresolutie-gammaspectrometer vaststellen welke elementen er in zitten en hoeveel", legt de natuurkundige uit. "Zo hebben we op het stuk piramidesteen vrij eenvoudig een sporenelementenanalyse uitgevoerd."

Blaauw vond voornamelijk calciumcarbonaat (CaCO_3) met sporen van andere elementen. Daarmee verschilt het niet van natuurlijk kalksteen.

"Wel zat er 1% keukenzout (NaCl) in. Maar dat is niet vreemd voor sedimentgesteente. Bovendien kwam mijn vader niet geheel zonder afschuw uit de scheur in de nis te voorschijn. Het werd gebruikt waar afgezonderde hoekjes bij toeristische attracties wel eens vaker bij hoge nood voor worden gebruikt."

Het spoortje iridium dat ze vonden, een stof die altijd van buiten de aarde afkomstig moet zijn, schrijft hij gemakshalve maar toe aan de inslag van meteorieten aan het eind van het Krijt. In buitenaardse wezens gelooft hij niet. Hoewel een elementenanalyse sowieso geen uitsluitsel kan geven of een steen is gehakt of gegoten, leverde het Blaauw toch nog een nuttig resultaat: sporen van uranium, thorium en kalium.

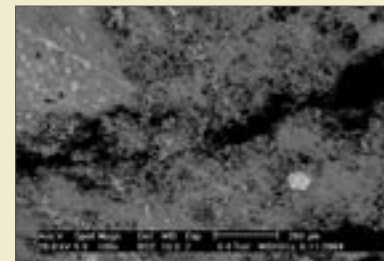
"Dat die er in zitten is niet vreemd. Deze elementen vind je overal in de aardkorst. Naast de kosmische straling vormen deze sporen een belangrijke bron van onze dagelijkse stralingsbelasting. Maar voor het dateren van het stukje piramide vormen ze een interessante radioactieve bron."

Luminescentiedatering In vrijwel alle gesteente zitten stukjes veldspaat of kwarts. Onder invloed van ioniserende ("radioactieve") straling verhoogt de spanning in de kristalstructuur van deze mineralen. De Cheopssteen bevatte vooral veldspaat. De verhoogde spanning als gevolg van de ioniserende straling is als door een soort fotografische film vastgelegd. Hiermee is de leeftijd van steen te bepalen.

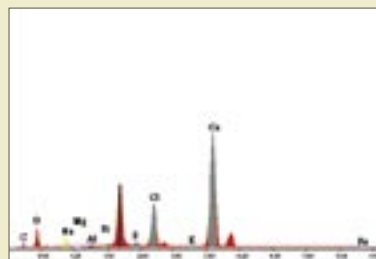
Blaauw: "Het is als een film die wel is belicht, maar nog niet is ontwikkeld. Om het veldspaat vrij te maken, wordt de steen onder donkere kamercondities vermalen en in oplossing gebracht, waarbij de veldspaat niet oplost. Die



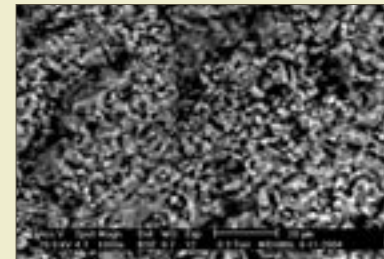
Blaauw cs. waren erg nieuwsgierig naar de samenstelling van de rode kleur in deze scheur.



Het gebied van de rode scheur gescand met de ESEM.

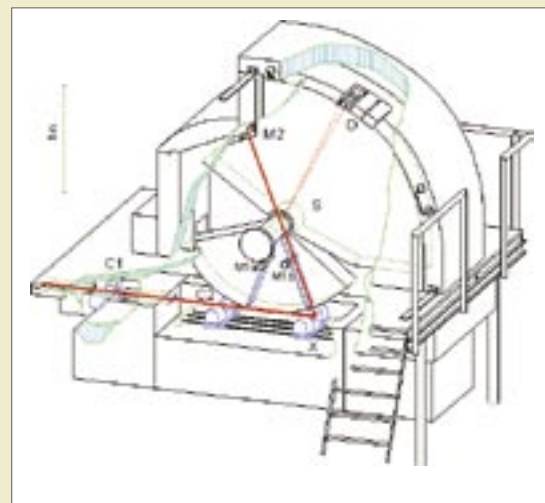


Het röntgenspectrum van een meting met de ESEM toont de samenstelling van de verschillende elementen in de steen. Volgens verwachting is calcium zeer dominant aanwezig. Door het vergelijken van twee metingen blijkt dat de rode kleurstof ijzerchloride is.



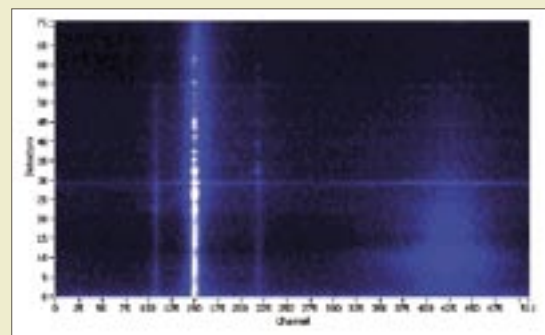
Verder inzoomen op de Cheops-steen biedt geen nieuw informatie.

Met de door het IRI ontwikkelde roterende kristalspectrometer (RKS) was Blaauw niet in staat om aan te tonen dat de Cheopssteen (S) water bevatte. De RKS werkt als volgt: neutronen komen links-onder uit de reactor het apparaat binnen. Twee zogenoemde choppers (C1 en C2) hakken de stroom op in pulsen van neutronen met een ongeveer bekende golflengte. Wanneer de pulsen het kristal (X)



raken, worden alleen neutronen met een zeer precies bekende golflengte gereflecteerd. De stand van het kristal bepaalt de golflengte. Door het kristal te roteren worden neutronen gereflecteerd met een breed spectrum van golflengtes in de tijd. De bedoeling van de meting is de fracties neutronen te meten die in een bepaalde richting en met een bepaalde snelheid worden verstrooid door het monster. De neutronen die rechtdoor vliegen worden geteld in monitor M2, terwijl de verstrooide neutronen worden waargenomen door honderden detectoren (D). Ook het tijdstip van detectie wordt vastgesteld, zodat een vluchttijdmeting mogelijk is. Alle detectoren zijn gebaseerd op absorptie van neutronen door ^3He .

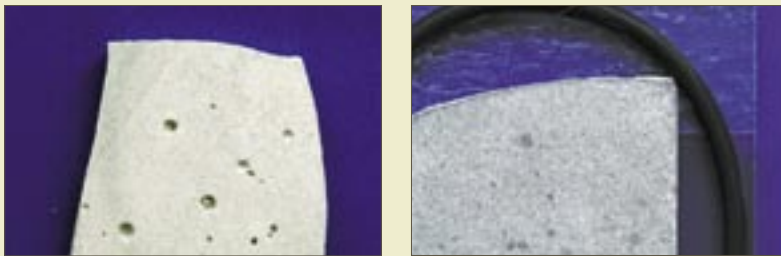
Resultaat van de RKS-meting: de X-as correspondeert met de neutronensnelheid en de Y-as met de verstrooiingshoek. De kleur geeft aan welke fractie van de neutronen onder welke hoek en met welke snelheid is aangekomen.



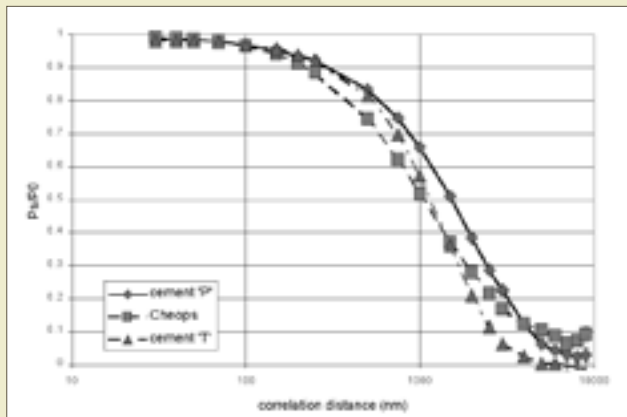
Om de poriestructuur en de ordening van de poriën te kunnen bepalen, maakte Blaauw gebruik van de SESANS. Dit apparaat werd de afgelopen jaren ontwikkeld op het IRI in het team van Dr. Wim Bouwman. De opstelling bestaat uit een monochromator, een polarisator, vier elektromagneten, een analysator en een detector.



SESANS werkt als volgt: Neutronen die de monochromator (een kristal) passeren hebben dezelfde golflengte. Door middel van een spiegel worden neutronen met dezelfde spin geselecteerd (gepolariseerd). Vier elektromagneten draaien de spinrichtingen linksom of rechtsom. Na het passeren van het monster wordt de verdeling van de spinrichting van de verstrooide neutronen gemeten met de analysator en de detector.



Bij het Microlab van de faculteit Civiele Techniek zijn twee proefstukjes gemaakt van duidelijk verschillende types cement. Het linker proefstuk is gemaakt van Portland cement, het rechter steentje is gemaakt van hoogovencement.



Het SESANS meetresultaat. Op de x-as staan afstanden binnen het materiaal, de y-as correspondeert met de

kans om op die afstand van een willekeurig gekozen punt in de vaste stof, wederom vaste stof aan te treffen. De curves geven aan dat de twee cementtypes alleen in grofheid van de poriestructuur verschillen, terwijl de curve van het Cheopsmonster rond de 10 µm echt ander gedrag begint te vertonen: De curves snijden elkaar.



Veldspaat en kwarts zijn mineralen die door de blootstelling aan ioniserende straling energie opslaan. Daglicht maakt de opgeslagen energie vrij in de vorm van zichtbaar licht. De Cheops-steen bevatte geen kwarts maar alleen veldspaat, dat met behulp van infrarood

licht wordt uitgelezen. Dit gebeurde bij het binnen het Reactor Instituut Delft gevestigde Nationaal Centrum voor Luminiscentiedatering.

condities zijn nodig, omdat gewoon daglicht al genoeg is om de spanning weg te laten lekken. We schijnen met infrarood op het veldspaat en krijgen zichtbaar licht terug. De hoeveelheid afgegeven zichtbaar licht is een maat voor de spanning en dus voor de stralingsdosis die het gesteente heeft opgelopen sinds het voor het laatst het daglicht heeft gezien. Wanneer het gesteente is uitgelezen, is het gelijk ontladen. Dit experiment kan je dus maar eenmaal doen.” Omdat de sterkte van de stralingsbron (uranium, thorium, kalium) bekend is, en daarmee de snelheid waarmee de “schade” wordt aangebracht, kan aan de hand van de gemeten schade, het tijdstip berekend worden waarop zijn Cheopssteen voor het laatst daglicht heeft gezien. Helaas: de uitkomst was 400.000 jaar geleden.

“Dit is overigens een ondergrens, het kan ook langer geleden zijn. Uiteindelijk lekt de spanning weg en springt het veldspaat een beetje terug. Als de steen uit gemalen kalksteen was opgebouwd dan had de teller op 2600 BC moeten staan. Mocht de veldspaat tijdens het vermalen niet het daglicht hebben gezien, dan was het zeker tijdens de bereiding van cement uit kalksteen teruggesprongen, omdat dat deels in ovens bij hoge temperatuur plaatsvindt. Ook Davidovits gaat er vanuit dat de Egyptenaren op deze manier hun cement maakten.”

Doorslaggevend Blaauw is om. Hoe graag hij de hypothese die zijn vader aanhing ook had bewezen. “Uiteraard is meer onderzoek nodig om ondubbelzinnige uitspraken te doen over de steen van Cheops. Zoals vergelijking met andere materialen waaronder de kunstmatige stenen van Davidovits. Maar onze steen is gewone natuurlijke zandsteen en geen handmatig gietsel. De luminescentiedatering is voor mij het doorslaggevende bewijs.”

Het gehalveerde stukje steen van Cheops en de vele brokstukjes zitten nu opgeborgen in een plastic monsterzakje. Zijn resultaten stuurt hij nog aan Davidovits als tegenbewijs voor zijn steengiettheorie. Recent is er een nieuwe voorstander van deze theorie aan het firmament verschenen: de Belgische natuurkundige Guy Demortier die de aanwezigheid van arsenicum en ongebruikelijke siliciumoxidebindingen als aanwijzingen voor de steengiettheorie ziet. Blaauw met zijn activeringsanalyse heeft echter maar 1 mg/kg arseen aangetroffen, en geen silicium. Ook dit idee van Demortier wordt dus niet ondersteund door Blaauw's metingen. De claim van Davidovits dat de fossielen in kunststeen chaotisch door elkaar liggen, snijdt volgens hem ook geen hout.

“Dat is ook het geval in het materiaal waaraan ik gemeten heb, maar petrologen zien daar niets bijzonders in. Het geeft dus alleen maar aan dat we het over hetzelfde soort materiaal hebben. Natronloog (NaOH) zou een ingrediënt van het cement moeten zijn volgens Demortier en Davidovits. Maar natrium is in dezelfde molaire concentratie aanwezig als Cl, dus als gewoon keukenzout, en dat is niks bijzonders in sedimentatiegesteente.”

Blaauw gebruikte natuurlijk maar een klein stukje steen uit een enorme piramide. In hoeverre is dit representatief?

“Een moeilijke vraag. In Davidovits boek staat een tekening van de fossielenstructuur die gelijk is aan wat we in ons stukje zien, dat geeft vertrouwen. En het komt uit het hart van de piramide. De kans dat je uit 7 miljard kilo kunststeen een monster van 50 gram natuurlijk zandsteen trekt lijkt me niet zo groot... Maar we hebben natuurlijk slechts een klein stukje steen uit een enorm piramide gebruikt, dat is waar. Het laatste woord is hierover nog niet gezegd.”

Voor nadere informatie over dit onderwerp kunt u contact opnemen met dr. Menno Blaauw, tel. (015) 278 3528, e-mail m.blaauw@tnw.tudelft.nl

Meer informatie over de theorie van prof. Joseph Davidovits:

- *La Nouvelle Histoire des Pyramides d'Égypte*, ed. Jean-Cyrille Godefroy, Paris, 2004, ISBN 2-86553-175-9.

- *Ils ont bâti les pyramides*, ed. Jean-Cyrille Godefroy, Paris, 2002, ISBN 2-86553-157-0.

- *The pyramids: an enigma solved*, Hippocrene Books, New York, 1988, ISBN 0-87052-559-X