

De grootste zoutvlakte in Tunesië:

Chott el Djerid

door Ronald van Duijvenvoorde

Tunesië in vogelvlucht

Het huidige Tunesië is gelegen in het subtropische deel van het Middellandse-Zeegebied, omringd in het noorden en oosten door water (de Middellandse Zee), in het westen door de Sahara. Het noorden van Tunesië is relatief vlak ten opzichte van het dominerende Dorsale en Tellgebied. In centraal Tunesië liggen halfwoestijnen en de bekende zoutvlaktes, waaronder Chott el Djerid. Het westen en zuiden wordt gekenmerkt door het Dahar Plateau, uitlopers van de Sahara en grindwoestijnen (zie afb. 1).

De Tunesische zomers zijn warm vanwege subtropische hogedrukgebieden en de sirocco (een schrale wind die vanuit het zuiden - zuidwesten zand, warmte en stof meevoert) veroorzaakt periodiek een hittegolf van oktober tot april. Temperaturen van boven de 45 °C zijn niet ongebruikelijk in de zomerperiode. In de periode van november tot januari is het koeler en regenrijker, doordat in deze periode de vochtige noordwestelijke luchtstromen vanaf de Atlantische Oceaan regen meevoeren, die voornamelijk valt in het noorden en centrale deel van Tunesië.

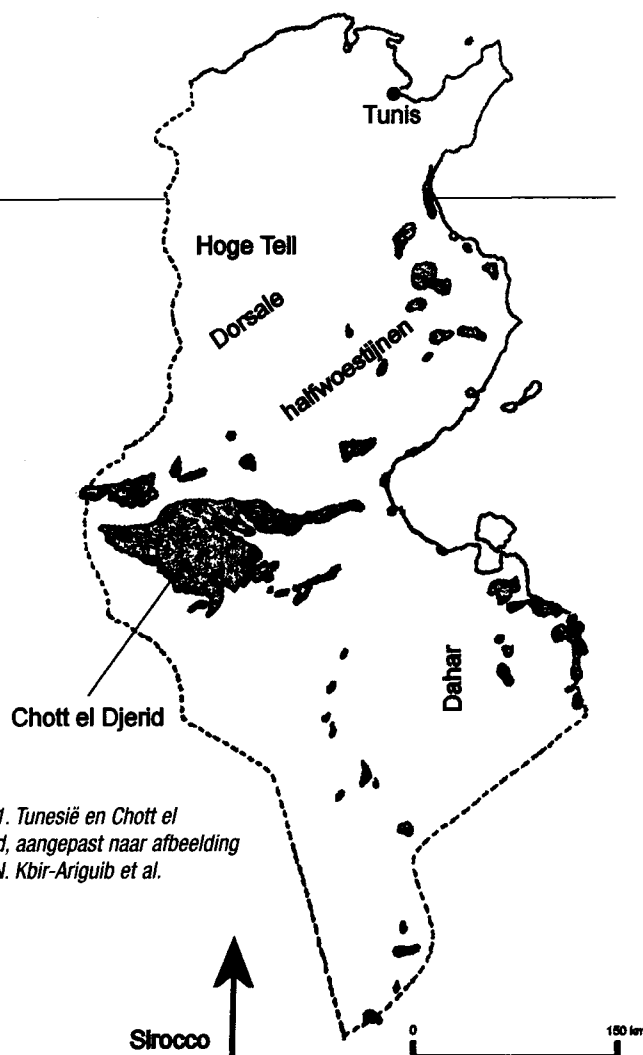
Geschiedenisles

Noord-Afrika en Tunesië kennen een bewogen historie: de oudste sporen van menselijke bewoning in het huidige Tunesië dateren van ongeveer 42.000 jaar geleden. Echter, een van de eerste beter bekende beschavingen is de Capsien-beschaving die floreerde tussen 10000 en 5000 voor Chr. Rond 5000 voor Chr. verspreidden de Feniciërs zich langs de kust van heel Noord-Afrika en stichtten in 814 voor Chr. de beroemde stad Carthago. De Fenicische Beschaving ontwikkelde zich zeer voorspoedig en hun invloed strekte zich uit tot Malta, Sardinië, Sicilië, de Balearen en zelfs Zuid-Spanje. Carthago trachtte Sicilië in te lijven en daardoor ontstond een conflict met Rome, dat leidde tot de drie Punische Oorlogen en de verwoesting van Carthago in 146 voor Chr. De pleegzoon van Caesar, Octavianus herbouwde Carthago rond 44 voor Chr. en het nieuwe Carthago werd de hoofdstad van de Romeinse provincie Africa.

Tunesië is verder nog ingenomen door de Vandalen en later door de Byzantijnen en tenslotte vestigden de Arabieren zich er en veroverden in 698 Carthago. Tot 1574 werd Tunesië geregeerd door verschillende islamitische groeperingen, waarna de Turken het land inlijfden in het Osmaanse Rijk. Uiteindelijk werd op 12 mei 1881 het Franse protectoraat ingesteld, waardoor Frankrijk feitelijk de dienst uitmaakte tot 1956, het jaar waarin het land onafhankelijk werd.

Noord-Afrika is ook de bakermat van vele mythen en legenden: volgens een Griekse overlevering uit de Klassieke Oudheid is een meer in Tunesië de geboorteplaats van Poseidon, god van de zee. Dit meer is Chott el Djerid volgens de historici: ze zijn van mening dat de huidige zoutvlakte het meer van Tritonis was. Hier ook ontmoette Odysseus de Lotuseters tijdens zijn 10 jaar durende zwerftocht (volgens Homeros in zijn *Odyssee*).

Tot zover de geschiedenisles: dit zijn slechts enkele hoogtepunten uit de lange periode van menselijke bewoning in het Noord-Afrikaanse land Tunesië. Centraal in dit artikel staat Chott el Djerid: een meer dat droog ligt gedurende het



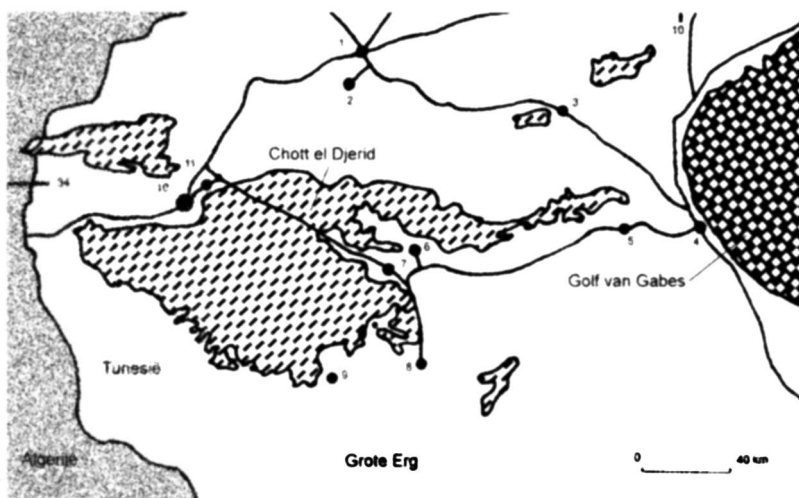
Afb. 1. Tunesië en Chott el Djerid, aangepast naar afbeelding van N. Kbir-Arighi et al.

droge, hete zomerseizoen, maar dat onder kan lopen in het winterseizoen. Dit is een jaarlijkse cyclus van seizoensgebonden overstromingen door regenwater gedurende de herfst- en wintermaanden. Eens per 20 jaar ontvangt de zoutvlakte exceptioneel veel regenwater: de laatste keer dat dit gebeurde was in 1990 (er viel ongeveer 6 maal de jaarlijkse hoeveelheid water).

Chott el Djerid is dus een groot deel van het jaar een droge, hete vlakte, bedekt met een zoutkorst. De fata morgana's, de uitgestrekte desolaatheid en het surrealisme van de Chott hebben een diepe indruk achtergelaten, net als de gevonden fossielen en mineralen die de collectie van ondergetekende auteur aangevuld hebben uiteraard. Het is een belangrijk studiegebied voor hydrologisch, paleontologisch en astrobiologisch onderzoek (de zoutvlakte wordt o.a. gebruikt als aards analoon voor gebieden op Mars). Ook is het waarschijnlijk dat Chott el Djerid een belangrijke rol gaat spelen in de economie van Tunesië. Kortom: Chotts zijn op diversen uiteenlopende gebieden van belangrijke waarde en vandaar dit artikel over Chott el Djerid, de grootste zoutvlakte van Tunesië.

Chott el Djerid

De betekenis van het Arabische woord Chott is 'gesloten depressie', die van Djerid is 'palmbomenvlakte'. De Chott el Djerid is een 5.500¹ km² grote, blinkend witte en onvruchtbare, omsloten laagvlakte, waar door opstijgende lucht (wegens de hitte) en reflectie van zonlicht door de zoutkristallen lucht-



Afb. 2. Detailkaart van Chott el Djerid en omliggende kleinere Chotts. Omringende steden zijn aangegeven met nummers: 1. Gafsa, 2. M'Dhilla, 3. Sidi Mansour, 4. Gabès, 5. El Hamma, 6. Seltimi, 7. Kebili, 8. Douz, 9. El Faour, 10. Tozeur en 11. Degache. De getallen 34 en 10 bij horizontale resp. verticale streep zijn de geografische breedtes.

Enkele statistieken voor het gebied: gemiddelde jaarlijkse regenval is tussen de 80 en 120 mm en de gemiddelde temperatuur is 21 °C! De jaarlijkse verdamping ligt rond de 1500 mm en is het hoogste tussen mei en september. Het is een gebied waar de combinatie van eolische (windwerking), fluviatiele (rivierwerking) en lacustriene (betrekking hebbend op de omstandigheden van binnenmeren) processen de ontwikkeling bepa-

len: de wind waait in het zomerseizoen overheersend uit het zuiden - zuidwesten. Chott el Djerid is de grootste van een gordel van dergelijke zoutvlaktes in Tunesië en Algerije.

Vorming

De Chotts zijn gevormd op de grens tussen het stabiele Sahara platform in het zuiden en het Atlasgebergte in het noorden: ze zijn het huidige resultaat van een lange tektonische geschiedenis. De bodem van Chott el Djerid bestaat uit dikke lagen sedimentgesteente die afgezet zijn in tijden dat de equatoriale oceaan Tethys, waarvan de Middellandse Zee een overblijfsel is, zich verder landinwaarts bevond. De Tethys Oceaan scheidde het noordelijke continent Laurasië van het zuidelijke Gondwanaland.

Gedurende het Mesozoïcum en Kenozoïcum hebben verschillende transgressies van de Tethys Oceaan plaatsgevonden in het huidige Noord-Afrika. Betreffende de vorming van Chott el Djerid waren o.a. een grote transgressie in het Cenomanien (vroegste Laat-Krijt, 93-99 miljoen jaar geleden) en een in het Laat-Pleistoceen van belang. Dikke pakken sedimentgesteente werden in deze twee periodes gevormd, waarvan een deel zich bevindt in de huidige ondergrond van Chott el Djerid. Ook eerdere en latere transgressies (bijv. in het Vroeg-Krijt, Mioceen en Holocene) droegen op hun beurt bij aan de neerslag van evaporieten en andere gesteente waaruit de verschillende lagen bestaan. Voor meer informatie betreffende de Tethys Oceaan is het een aanrader om het artikel over Cyprus van drs. W.C.P. de Vries (Gea 2003, nr. 1) er nog eens op na te slaan!

Kortom: de Chott is een bekken van series dikke pakken sedimentair gesteente, waarvan de oudste gevormd zijn in het Vroeg-Krijt (mergel, gips, kalksteen, zandsteen, klei), daarop volgend sedimenten uit het Laat-Krijt (kalksteen, fosfaten, gips, klei) en daarna Tertiaire sedimenten, die voornamelijk gevormd zijn in het Mioceen - Plioceen (zandsteen, gips, klei, mergel). De bovenlaag is gevormd in het Pleistoceen en Holocene en bestaat uit alluviaal materiaal, eolische duinen en zouthoudende sedimenten. Gedurende het Holocene zijn van 12.000 tot 10.000 en van 7500 tot 5500 jaar geleden eolische afzettingen gevormd (duinpartijen); lacustriene sedimentatie (in meren) vond plaats in het Laat-Pleistoceen en rond 9000 jaar geleden.

Het sedimentgesteente is onder andere rijk aan mariene evaporieten (verbindingen met gips, carnalliet en haliet). Deze evaporieten zijn het resultaat van neerslag van oplosbare zouten door oververzadiging van het water van de toenmalige meren en binnenzeeën. Tot deze categorie behoren voornamelijk de chloriden en sulfaten. Deze sulfaten komen ook voor in het grondwater, waarschijnlijk is het gips afkomstig van de evaporieten de bron hiervan. De evaporieten zijn niet alleen van economisch belang zoals zal blijken, maar ze zijn ook in steeds grotere mate van

spiegelingen ontstaan die in de verte op trillende palmbomen lijken.

Rondom de zoutvlakte liggen steden als Nefta, Tozeur (bekend van de prachtige oase en watervallen), Metlaoui, Gafsa (waarnaar de Capsien-beschaving vernoemd is), Kebili en Douz. Ten zuidwesten ligt de Oostelijke Grote Erg, het overgangsgebied naar de Sahara, ten noorden (hooggelegen) halfwoestijnen en de Dorsale, ten zuidoosten de uitlopers van het Dahar Plateau en ten oosten ligt de Golf van Gabès (zie afb. 1 en 2).

Zoutvlaktes zoals Chott el Djerid zijn anders dan de gebruikelijke zoutmeren of binnenzeeën, vandaar dat ik het woord zoutvlakte gebruik. Een groot deel van het gebied wordt bedekt met een zoutkorst waaronder een sponsachtige ondergrond schuilt die van groot belang is voor de interne drainage en waterhuishouding van het gebied.

Hoewel het oppervlak van de Chott het grootste deel van het jaar dus watervrij is, ligt het niveau van het zoute grondwater vrij hoog. Via capillaire werking stijgt het grondwater door het poreuze sedimentgesteente, waaruit de bodem bestaat, naar het oppervlak en verdampt daar. Als dit zouthoudende water door de capillaire werking verdamppt blijft een deel van de opgeloste zouten (gips, haliet en in mindere mate carnalliet) achter in het sedimentgesteente. Zo worden capillaire evaporieten genoemd. Een deel van de zouten blijft ook achter op het oppervlak en vormt op deze manier een deel van de korst. Het bovenste deel hiervan is vaak bedekt met een film van het zoute grondwater dat door de capillaire werking omhoog is gekomen.

De samenstelling van het grondwater van Chott el Djerid lijkt op 'gewoon' zeewater, maar de concentratie ionen is 10-20 keer hoger! Heden staat Chott el Djerid niet meer in directe verbinding met de zee (in het verleden was het een onderdeel van de Middellandse zee) en ligt de vlakte tussen de 15 en 20 meter boven de zeespiegel. Alleen door sterke regenval in de winter kan de vlakte overstroomd, als de toevoer van regenwater groter is dan de verdamping. De Chott kan dan een meer vormen van maximaal 2 meter diep, waarin de gevormde zoutkorst weer oplost. Alleen dan is er in feite sprake van een 'zoutmeer', maar slechts voor een paar maanden. Vaak valt er echter niet genoeg water om een binnenzee te vormen en is er slechts sprake van ondiepe poelen, verspreid over de vlakte. Na de regenval in de winterperiode ontstaan er ook kanalen in het gebied, die stromen van de hoger gelegen rand van de vlakte naar het lager gelegen middendeel. Er is geen toevoer van water meer vanuit de Middellandse Zee en deze heeft dan ook praktisch geen invloed meer op de waterstand in de zoutvlakte.

Het gevormde meer (of de poelen), rijk aan zouten uit de ondergrond, verdampt weer binnen korte tijd, zodat voornamelijk de mineralen haliet en gips (die in grote hoeveelheden aanwezig zijn in de bodem) achterblijven op het oppervlak. Eolisch en alluviaal transport vanuit de bergen zorgt ook voor een hoeveelheid silicaten in het water.

belang in de reconstructie van paleo-ecologische en pre-historische milieus.

Zoutpan

Het oppervlak van zoutvlaktes zoals Chott el Djerid wordt geclassificeerd in een aantal geomorfologische gebieden. Afb. 3, 4, 5, 6. Het centrale gedeelte, dat het laagste ligt, heet de zoutpan, waarin haliet het meeste voorkomt. Deze haliet bestaat uit individuele kristallen en clusters van enkele centimeters. Als het zomerseizoen vordert en de groei van de zoutkorst in de zoutpan erg uitbundig is, kunnen er door scheuring van de korst vanwege de hitte onregelmatige, veelhoekige structuren ontstaan, die tot ongeveer 20 cm dik kunnen worden. Deze polygonale structuren, met een 'levensduur' van enkele maanden, kunnen individuele diameters hebben van 1-2 m en kunnen vele km² beslaan. Het grondwaterniveau in de zoutpan is erg variabel, in de winter is de zoutpan meestal bedekt met ondiepe poelen zout water (of in enkele gevallen wordt er een binnenzee gevormd tot ongeveer 2 m diep) terwijl in het droge zomerseizoen het grondwaterniveau kan dalen tot 1 m onder het oppervlak.

Zilte gipshoudende moddervlakte

De zoutpan wordt omringd door zilte moddervlaktes waar in de bodem gips aanwezig is en waar *aioun* (1-5 meter wijde putten gevuld met brak water) voorkomen. In dit gebied zijn meer dan 20 soorten reptielen geïdentificeerd en leven grote

kolonies prachtige flamingo's, die zeker de moeite waard zijn om te bekijken. De moddervlaktes worden meestal bedekt door een dunne korst van haliet en gips, terwijl het grondwater in de moddervlaktes zelden lager staat dan 2 m. De constante toestroom van water uit het Sahara Bekken is de reden daarvoor. Het Sahara Bekken beslaat het grootste deel van de Algerijnse en Tunesische Sahara en strekt zich uit tot Marokko en Libië. Ook zijn er hier en daar kanalen te zien, die lopen van de rand van het bekken tot in de zoutpan. Een van de grotere kanalen, die zich aan de oostelijke kant van de zoutvlakte bevindt, verbindt Chott el Djerid en Chott el Fedjadj, de oostelijke arm van Chott el Djerid.

De moddervlaktes maken plaats voor ongeveer 15 km brede zandvlaktes, waarvan het oppervlak gerimpeld is en bezaaid met evaporieten. Een van de meest spectaculaire bezienswaardigheden is het Pleistocene duingebied in de buurt van El Franig in het zuidwestelijke gedeelte van Chott el Djerid. Kortom: het oppervlak van Chott el Djerid bestaat dus uit een korst van gips, haliet, klei, kwarts (silicaten), zouthoudende poeltjes en zoutwaterkanalen hier en daar. Een groot deel van het gebied lijkt 's zomers in veel opzichten op de bekende foto's van gebieden op Mars, zoals gefotografeerd door Pathfinder.

Waterhuishouding

Een groot deel van het grondwater van Chott el Djerid is afkomstig van een complex stelsel aquifers, die zich in het Sahara Bekken bevinden. Deze ondergrondse waterreser-



Afb. 3. Kanaal dat loopt door de (droge!) moddervlakte in Chott el Djerid richting de zoutpan. Duidelijk zijn de witte zoutafzettingen te zien aan de rand het zoutwaterkanaal. De foto is genomen 30 juli 1998 aan het begin van de middag (deze en de andere foto's zijn gemaakt met een wegwerpcamera!).



Afb. 5. Een soortgelijk kanaal als in afb. 3. Dit gedeelte van het kanaal bevindt zich in de zoutpan. De witte zoutkorst (haliet, gips) is volop in ontwikkeling. Deze opname dateert van 1 augustus 1998 in de namiddag.



Afb. 4. Opname gemaakt van een deel van de moddervlakte die de zoutpan omringt. De zwarte structuren zijn algen, die voor een deel ingesloten raken in de zoutkorst. Foto genomen op 1 augustus 1998 in de namiddag



Afb. 6. Detailopname van de zoutkorst in de zoutpan van afb. 4. De gefotografeerde korstlengte is ongeveer 50 cm lang.

voirs bestaan uit lagen waterhoudend permeabel sedimentgesteente. Afb. 7.

De twee grootste aquifers heten respectievelijk *Continental Intercalaire* en *Complexe Terminal*, in goed Frans.

De eerste is gevormd in het Krijt en bestaat uit sedimenten die zijn afgezet door rivieren die stroomden van de huidige centrale Sahara naar de noordkust van Gondwanaland en uitmondden in de Tethys. De *Complexe Terminal* bevindt zich hoger dan de *Continental Intercalaire*, ze worden gescheiden door vele lagen semi-permeabel gesteente. Het oppervlak van de *Complexe Terminal* is ongeveer de helft van dat van de *Continental Intercalaire*: beide zorgen voor een grote voorraad water waarvan ook door de bevolking dankbaar gebruik wordt gemaakt. De poreuze ondergrondse gesteentelagen zijn tijdens zeer natte periodes in het Pleistoceen en Holoceen gevuld met water, waardoor de aquifers zelf 'ontstonden'. De laatste grote influx van water vond 8.000 jaar geleden plaats, maar sinds het ontstaan van de aquifers stroomt er ook water naar de Chotts. Deze natuurlijke reservoirs raken langzaam leeg door menselijke exploitatie en natuurlijke afvoer met enkele millimeters per jaar. Op dit moment is er wel een relatief kleine toevoer via regenwater, maar de afvoer is veel groter!

De tweede aquifer (*Complexe Terminal*) bestaat uit dolo-miet, evaporieten en kalksteen uit het Laat-Krijt, Mio-Pliocene conglomeraten en zand. Chott el Djerid ontvangt het meeste water uit de *Complexe Terminal*- aquifer en tijdens het transport van dit grondwater verdampt er een deel via capillaire werking, wat zo bijdraagt aan de vorming van gips en haliet in de Chott.

Gesloten bekkens die vlaktes omvatten, zoals Chott el Djerid, behoren tot de gevoeligste hydrologische systemen voor neerslagpatronen. Vanwege hun 'vijandige' klimaat en geïsoleerdheid zijn ze nauwelijks beïnvloed door menselijk handelen.

De vlaktes ondergaan een complex samenspel tussen verdamping van water, neerslag van evaporieten en overstromingen. Er zijn nog geen modellen die deze cyclus compleet beschrijven. Veel wetenschappelijk onderzoek is er op dit moment dan ook gaande, want als de regionale seizoens-

gebonden cycli beter verklaard worden, kunnen ook huidige klimaatveranderingen in deze gebieden beter begrepen worden. Gegevens, beschikbaar uit de verschillende sedimentlagen van de Chott, kunnen zodoende informatie verschaffen waarmee paleoklimatologen op basis van ontwikkelde en nog te ontwikkelen modellen uitspraken kunnen doen over het klimaat en klimaatsveranderingen in het verleden. Reeds is gebleken dat in deze gebieden droge en natte periodes elkaar afwisselen sinds het Pleistoceen.

Duidelijk is dat in gebieden zoals Chott el Djerid de verdamping groter is dan de instroom van water en uitstroom is er niet of nauwelijks. In hydrologische termen zijn de Chotts voornamelijk uitstroombuizen van het eerder genoemde systeem van aquifers en het grondwater, waarvan het peil dichtbij de oppervlakte ligt, is een zeer belangrijk onderdeel van de lokale waterhuishouding, net als de directe neerslag.

Hydrologische cyclus

Om de belangrijkste geologische punten betreffende Chott el Djerid samen te vatten volgt nu een systematisch overzicht van de cyclus die de zoutvlakte jaarlijks doorloopt. Het uitgangspunt is de vorming van een ondiep zoutmeer, zoals die in een gemiddeld jaar plaatsvindt. In extreem droge jaren wordt de cyclus eenmalig onderbroken en in extreem natte jaren, zoals in 1990, is de gehele cyclus uiteraard wel van toepassing, alleen met een hogere initiële waterstand. Afb. 8.

1. Overstroming

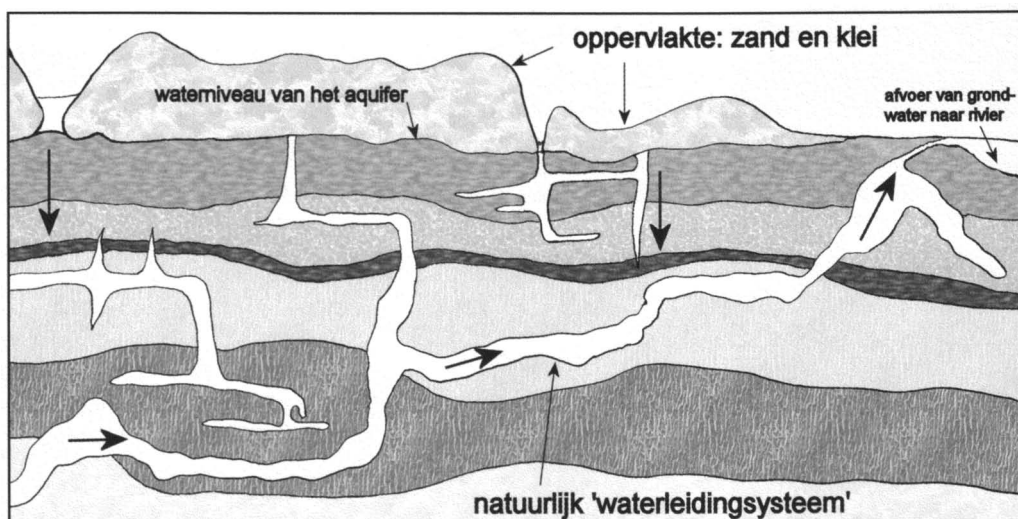
De winterperiode (november - januari) is in Tunesië vochtig, zodat in januari de zoutvlakte overstroomt. De gevormde haliestructuren in de zoutpan (die het laagste ligt!) lossen snel op en zo wordt er een brak meer gevormd. Er is sprake van sterke bacterie- en algenbloei in dit meer. Op een gegeven moment zal ook een deel van de moddervlaktes onder water komen te staan. De aanwezige gipsstructuren (en het in mindere mate aanwezige haliet) in de bovenste sedimentlagen lossen op in het grond- en oppervlaktewater.

2. Verdamping

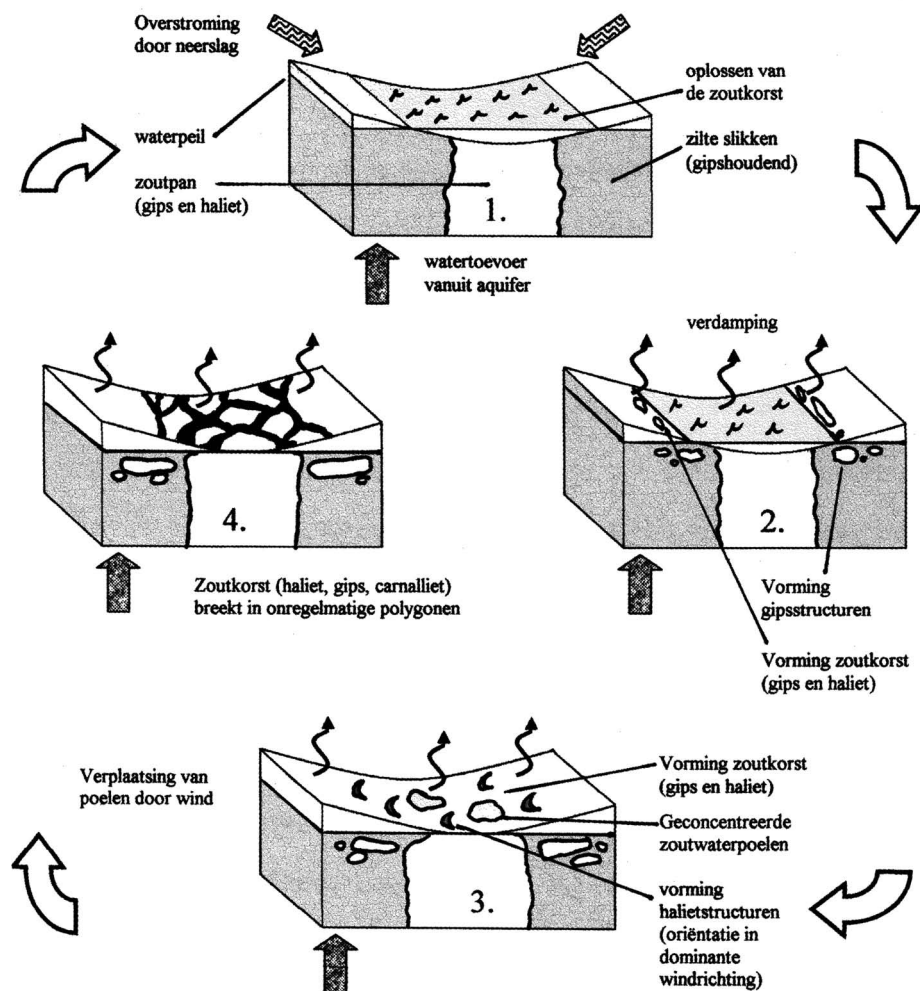
In de maanden februari - augustus verdampt een groot deel van het zoutmeer, zodat het waterpeil zakt en er een ondiep zout meer ontstaat waarin bacteriën en algen welig tieren. Gips en haliet kristalliseren in dit stadium aan de rand van het meer in de zilte moddervlaktes, zodat er een dunne korst ontstaat waar het water terugtrekt door de verdamping. In de bovenste lagen sedimentgesteente van de moddervlaktes kristalliseert gips (en haliet in mindere mate) als het grondwaterpeil zakt. Dit proces zet zich voort tijdens fase 3 en 4.

3. Zoutwaterpoelen

De laatste verdamping vindt plaats van augustus tot september: er ontstaan geconcentreerde zoutwaterpoelen, verzadigd met haliet. Deze poelen verplaatsen zich door toedoen van de wind, zodat er gerimpelde structuren van haliet ontstaan, georiënteerd in de windrichting. Ook zal de zoutkorst in de zoutpan



Afb. 7. Algemene schematische voorstelling van een aquifer. Deze aquifer ontvangt zijn water via kanalen in de bovengrond door regenval (pijlen naar beneden) en het water bevindt zich hier in een groot aantal lagen poreus gesteente. Ook in het verleden kan een aquifer zijn ontstaan tijdens natte periodes ('fossiele' aquifer), zoals de aquifer waaruit Chott el Djerid zijn water ontvangt en die nu nog nauwelijks influx van water heeft. Het grondwater kan via een stelsel natuurlijke leidingen naar een rivier, beek of Chott stromen en zo afgevoerd worden (van links naar rechts in de voorstelling, door de 'leidingen'). De (gekleurde) gesteentelagen zijn afgezet in verschillende periodes en zijn niet allemaal per definitie permeabel voor water, dit is per aquifer uiteraard verschillend. Doordat niet elke laag permeabel is, kunnen er in hetzelfde gebied verscheidene aquifers boven elkaar zijn ontstaan in verschillende periodes, eventueel met elkaar in verbinding, zoals het stelsel aquifers in het Sahara Bekken.



Afb. 8. Hydrologische cyclus van Chott el Djerid schematisch weergegeven. De nummers 1-4 in de afbeelding corresponderen met de nummers 1-4 in de tekst.

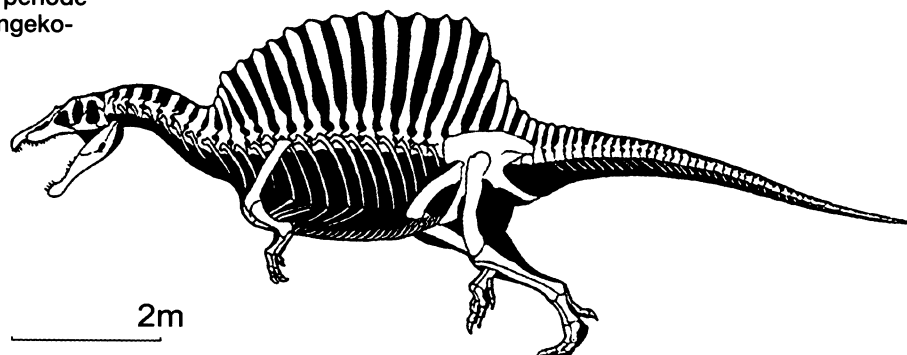
dikker worden door verdere kristallisatie van gips, haliet en carnalliet.

4. Droge zoutpan

De totale zoutvlakte dehydreert in de periode september - oktober en haliet, gips en carnalliet worden doorlopend afgezet, zodat de zoutkorst nog verder groeit tot een dikte van maximaal 20 cm. De waterstroom uit de aquifer wordt constant verondersteld, zodat in fases 2, 3 en 4 door de capillaire werking van het sedimentgesteente en daaropvolgende verdamping van het toegevoerde grondwater wordt bijgedragen aan de vorming van de haliet- en gipskorst op de oppervlakte van Chott el Djerid. In de zoutpan zal de halietkorst scheuren door de droogte en onregelmatig gevormde polygonen vormen.

Niet elk jaar zal er een zoutmeer ontstaan, in 'normale' winters zal de neerslag zodanig zijn dat er slechts sprake zal zijn van poelvorming. De winterperiode zal weer aanbreken en zo zijn we weer aangeko-

Afb. 9. Reconstructie van een *Spinosaurus aegyptiacus*. De reconstructie is tot stand gekomen door de vondst van nekwerfels, ruggenwerfels met complete rugstekels, ribben, delen van de boven- en onderkaak, vele tanden, staartwerfels en delen van de achterpoten te combineren en te vergelijken met het veel completere skelet van het naaste familielid *Suchomimus*. De reconstructie is een bewerking van een afbeelding uit het Tate Geological Museum (Wyoming).



men bij fase 1. Zo is dus ook de vorming van lacustriene evaporieten een continu proces: de 's' zomers gevormde zoutkorst (de evaporiete mineralen) lost tijdens de jaarlijkse overstroming op in het regenwater en wordt door verdamping opnieuw gevormd.

Fossielen uit het Krijt

Puntje van aandacht: de vertebrate fauna's van Tunesië in het Krijt zijn relatief weinig bestudeerd, terwijl het *Continental Intercalaire* een van de weinige vindplaatsen van bijvoorbeeld *Spinosaurus* (Midden-Krijt) en *Carcharodontosaurus* is, waarvan verder fragmenten zijn gevonden in onder andere Egypte, Marokko, Algerije, Niger en Soedan. Afb. 9.

Ook is tijdens Tunesisch-Frans-Engelse expedities in 1997 en 1998 het eerste bewijs gevonden van pterosauriërs uit deze periode! Er zijn in het noorden van Afrika grote hoeveelheden fossielen uit het Krijt gevonden, niet alleen van dinosauriërs, maar ook van haaien, beenvissen, schildpadden, krokodillen. Zelf heb ik tijdens een vakantie in 1998 verschillende soorten oesters en haaietanden uit het Boven-Krijt gevonden aan de noordelijke rand van Chott el Djerid, in de buurt van het stadje Metlaoui, maar helaas geen vertebraten.

De eerste *Spinosaurus* werd in Egypte gevonden in 1915, dezelfde periode dat Alfred Wegener voor het eerst de theorie van plaattektoniek voorstelde. Deze resten werden in de Tweede Wereldoorlog helaas door bombardementen vernietigd. Ondertussen zijn meer leden van deze familie ontdekt, zoals de *Baryonyx* (Engeland) en *Suchomimus*. Ook van *Spinosaurus* zijn gelukkig weer resten ontdekt (kaakfragmenten, tanden, delen van de achterpoten, wervels, etc.). Deze drie soorten worden (met nog enkele andere) ondergebracht in de familie Spinosauridae met als subfamilie Spinosaurinae (*Spinosaurus*) en Baryonychinae (*Baryonyx* en *Suchomimus*).

Een voorzichtige schatting van de lengte van *Spinosaurus* gaat uit van 12 meter, hoewel sommige bronnen een lengte van 17 m vermelden (en daarmee zou hij tot de langste carnivore dinosauriërs behoren die tot nu toe bekend zijn). Dit dier is bijzonder vanwege de lange rugstekels (vandaar zijn naam), die waarschijnlijk een zeil ondersteunden (dat

zo'n 1.80 m groot kon worden). Het zeil diende waarschijnlijk voor warmteregulering (opwarmen in de zon of afkoelen in de schaduw) en om op te vallen: bepaalde patronen of kleuren die extra benadrukt werden tijdens de paartijd of bij de verdediging van het territorium. Ook de *Suchomimus*, *Ouranosaurus* (familie van de bekende *Iguanodon*), *Acrocanthosaurus* (familie van de *Allosaurus*) en de *Amargasaurus* (sauropode) hadden een zeiltje, dus helemaal uniek is dit kenmerk niet.

Andere bijzonderheden van deze familie zijn de langwerpige schedel (vergelijkbaar met een krokodil), de vrij korte, rechte nek en conisch gevormde tanden zonder echte zaagranden: hierdoor lijken ze op tanden van krokodillen. Door deze kenmerken wordt aangenomen dat de leden van de familie Spinosauridae piscivoren (viseters) waren, die hun dieet af en toe aanvulden met vlees, net als de krokodil (de naam *Suchimimus* betekent 'krokodillenabootser'). Er is ook een *Spinosaurus*soort gevonden in Zuid-Amerika, wat ook weer een indicatie is dat de Krijtfauna uit Noord-Afrika van aanzienlijk belang voor de evolutie, de paleontologie en de paleogeografie, juist omdat Zuid-Amerika en Afrika sinds het Vroeg-Krijt echt uit elkaar gingen 'drijven' (hoewel de twee continenten in deze periode al wel 'los' van elkaar waren). De evolutie van flora en fauna in Zuid-Amerika en Afrika, die voor de splitsing van de twee continenten hand in hand liep, ging nu op beide continenten zijn eigen weg! Daarom worden o.a. Chott el Djerid en *Continental Intercalaire* sinds het laatste decennium uitgebreid door paleontologen bestudeerd.

Industrie

De zoutvlaktes gaan in de nabije toekomst voor de Tunesische bevolking waarschijnlijk een belangrijke bron voor de industrie en de agricultuur worden, omdat Chott natrium el Djerid, kalium, calcium, magnesium, chloor, sulfaten en carbonaten bevat. Tijdens de natte periode kan het zoutgehalte van het water in de Chott oplopen tot 330 g/l, hieruit blijkt dus ook zeker dat Chott el Djerid een significante bron van nuttige zouten is.

De Chotts zijn en worden uitgebreid bestudeerd: de eerste geologische en economische studies van de zoutvlaktes zijn begonnen aan het eind van de 19^{de} eeuw. Belangrijkste onderzoeksgebieden waren aan de ene kant de geologische aspecten, maar aan de andere kant ook het bestuderen van fasediagrammen (grafische weergaven van de samenstelling van zoutoplossingen). Met behulp van een fasediagram kan de beste manier gevonden worden om de zouten te winnen. De Franse amateur-geoloog Philippe Thomas ontdekte in 1885 grote lagen calciumfosfaten in Jerel Thelja, in de omgeving van Metaloui (ten noorden van Chott el Djerid). Deze belangrijke ontdekking werd gevolgd door uitgebreide geologische expedities waarbij nog meer fosfaatformaties werden gevonden. In 1896 werd de *Compagnie des Phosphates et de Chemin de Fer de Gafsa* opgericht: de fosfaat- en spoorwegmaatschappij van Gafsa. Rond 1900 vonden de eerste ontginningen plaats door deze nationale fosfaatindustrie. Na een halve eeuw slechts ruw fosfaaterts te hebben geëxporteerd, begon de Tunesische regering het erts te bewerken en dit resulteerde in de *Groupe Chimique Tunisien* (GCT). De GCT is een fusie en absorptie van 5 bedrijven die werkzaam waren op het gebied van fosforzuur en kunstmest tussen 1952 en 1992. Op dit moment is de compagnie getransformeerd in de *Compagnie des Phosphates de Gafsa* (CPG) en is de vijfde belangrijkste fosfaatproducent wereldwijd, met een jaarproductie van meer dan 8 miljoen ton. De huidige exploitaties van tien open mijnen in vijf Eocene fosfaatvelden is gelokaliseerd ten noorden van Chott el Djerid, in het Gafsa Bekken.

De gebieden rondom Chott el Djerid (en andere Chotts in Tunesië) worden dus al meer dan 100 jaar geëxploiteerd. Chott el Djerid zelf echter niet (op grote schaal), ondanks

de grote zoutvoorraden. Een reden kan zijn vanwege het lage oppervlaktewaterniveau, wat de totstandkoming van ene open mijn waarschijnlijk bemoeilijkt. Gedurende het zomerseizoen echter kan (een gedeelte van) de zoutkorst industrieel verwerkt worden tot o.a. keukenzout. Dit zou op een soortgelijke manier kunnen gebeuren als op bijvoorbeeld Bonaire. Hier worden grote vlaktes onder water gezet (zeewater) en ingedampt. Het zout dat achterblijft wordt verzameld, van schadelijke stoffen ontdaan en verwerkt. Tunesië heeft op dit moment echter nog geen openbare plannen in deze richting.

Op dit moment is men erg geïnteresseerd in modelvorming van de fasediagrammen die toepasbaar zijn voor zoutvlaktes zoals Chott el Djerid en de winning van nuttige zouten, maar ook op vele andere gebieden in Tunesië, want het land is rijk aan allerlei belangrijke stoffen zoals gebleken is: Zoals kaliumsulfaat, fosfaat en chloor voor de landbouw, natriumsulfaat voor de glas- en reinigingsmiddelenindustrie, magnesiumchloride voor vuurbestendige materialen en farmaceutische producten en natuurlijk natriumchloride (keukenzout) voor de voedselindustrie. Chott el Djerid bevat grote hoeveelheden van deze stoffen en gaat dus waarschijnlijk een grote rol spelen in de economie van Tunesië. Het grote struikelblok is echter de winning van de zouten in de Chotts vanwege het gebrek aan betrouwbare modellen van het zoute water ter plaatse (voor elke Chott is de samenstelling van de zouten weer anders) en het gebrek aan kennis van verschillende toepasbare extractiemethodes.

Mars

Onderzoek naar eventuele sporen van leven op andere planeten begint met de Aarde als referentiepunt. Processen op Aarde moeten eerst volledig begrepen worden om extrapolaties te kunnen maken naar soortgelijke processen op bijvoorbeeld Mars, de planeet die volop in de belangstelling staat. In augustus 2005 is de MRO (*Mars Reconnaissance Orbiter*) gelanceerd vanaf Cape Canaveral. Deze ruimtesonde moet de komende 5 jaar meer gegevens over Mars opleveren dan de afgelopen 10 jaar zijn verzameld. Daarom worden aardse analoge studies verricht om modellen te maken voor situaties zoals ze op Mars zijn en zullen worden waargenomen.

Chott el Djerid kent een grote algen- en bacteriegroei onder extreem zoute, droge en warme omstandigheden! Organismen die onder dit soort condities (extreme hitte of kou, erg zuur of zout water, etc) leven worden extremofielen genoemd. Een deel van deze organismen raakt ingesloten in de evaporieten die tijdens de hydrologische jaarcyclus worden gevormd en blijven zo bewaard (hoewel een groot deel van de korst en de daarin opgesloten micro-organismen weer oplost tijdens de wintermaanden en zo verloren gaat). Het insluitingsproces verloopt snel, wat van belang is voor de fossilisatie. Het blijkt dat (endolitische) micro-organismen uit Chott el Djerid ondanks het extreem droge en zoute milieu toch goed bewaard blijven door de mineralisatie van met name gips. Het droge en zoute milieu met evaporiete mineralen van de Chott is een geschikt aardse analogon van bepaalde lacustrien-achtige Martiaanse milieus waar mogelijke evaporiete afzettingen kunnen worden aangetroffen.

Chott el Djerid beschikt ook over fossiele afzettingen evaporieten (in het onderliggende sediment) waarin sporen zijn gevonden van bacterie- en algenkolonies. Evaporieten kunnen een grote geologische tijdspanne, waarin hydrologische cycli niet meer aanwezig zijn (zoals op Mars), 'overleven'. De eigenschap dat ze duiden op het feit dat er water aanwezig is geweest en dat ze verschillende sporen van leven kunnen bevatten, maakt dat astrobiologen een

speciale belangstelling hebben voor deze mineralen: de mogelijkheid bestaat dat organismen die op Mars hebben geleefd onder de extreme condities die er heersten zijn gefossiliseerd in daar gevormde evaporieten. Ook kan het zijn dat de evaporieten bepaalde mineralen bevatten die door specifieke biologische activiteit zijn ontstaan. De resultaten van analoge studies zijn instrumenteel voor correcte inschatting van eventuele sporen van biologische activiteit op Mars en andere planeten die in evaporieten bewaard zijn gebleven. Kortom: evaporieten zijn van groot belang voor allerlei takken van de astronomie en daardoor geldt dat ook voor Chott el Djerid!

Literatuurlijst

Bryant, R.G. et al., Marine-like potash evaporite formation on a continental playa: case study Chott el Djerid, southern Tunisia, *Sedimentary Geology* 1994; 90:269-291.

Friedman, E.I. et al., Terraforming Mars: dissolution of carbonate rocks by cyanobacteria, *Interplanet Soc.* 1993; 46:291-292.

Lowenstein, T.K. et al, Criteria for recognition of salt-pan evaporates, *Sedimentology* 1985; 32:627-644.

Vries, de, Drs. W.C.P., Cyprus, *Gea* 2003; vol. 36: 1-32
Zayani, L., Study of a Tunesian south brine, crystallization sequence and modelling, Doctorate thesis, Faculty of Sciences of Tunis, Tunisia (1999).

Geraadpleegde websites

<http://geosciences.smsu.edu/Faculty/Mickus>

<http://www.gct.com.tn/english/fertil.htm>

<http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro>

<http://www.graphicmaps.com/webimage/countrys/africa/tn.htm>

¹ De waarden in de literatuur verschillen van 4.600 – 6.000 km², maar in de meest recente literatuur wordt deze oppervlakte gegeven, bepaald m.b.v. satellietbeelden.

GEOCOMpositie 4

Spinel in bolletjes op K/T-grens weerspiegelt 'inslag-chemie'

De Krijt/Tertiair-grens wordt wereldwijd niet alleen gekenmerkt door een sterk verhoogde concentratie van het metaal iridium, maar ook door het voorkomen van glasachtige bolletjes (ter grootte van een zandkorrel). Voor het ontstaan hiervan zijn drie hypothesen ontwikkeld. De eerste gaat ervan uit dat de bolletjes werden gevormd door de wrijvingswarmte die de asteroïde ondervond na de dampkring van de aarde te zijn binnengedrongen; er zouden toen stukjes asteroïde zijn opgesmolten en verdamppt, waarna dit materiaal na afkoeling druppels vormde die op aarde uitregenden. Een tweede hypothese gaat ervan uit dat het materiaal afkomstig is van het gesteente op de plaats waar de asteroïde insloeg; de enorme warmte die daarbij vrijkwam zorgde voor verdamping van het gesteente, waarna de bolletjes uit het snel afkoelende materiaal op dezelfde wijze als in de eerste hypothese uitregenden.

Denton Ebel, assistent-curator voor de meteorieten van het American Museum of Natural History komt, met Lawrence Grossman, hoogleraar geofysica aan de Universiteit van Chicago, tot de conclusie dat een derde, eerder opgestelde hypothese juist moet zijn. Die hypothese houdt in dat zich na de inslag een wolk van verdampt materiaal vormde; de bolletjes zouden volgens hen vanuit deze wolk zijn uitgeregend. Ze komen tot die conclusie op basis van onderzoek aan spinel dat in de bolletjes voorkomt. Overigens hadden sommige onderzoekers eerder geopperd dat spinel zich niet in een dergelijke 'inslagwolk' zou hebben kunnen ontwikkelen, gezien het hoge gehalte aan geoxideerd ijzer.

Toen de asteroïde de aarde trof kwam zoveel energie vrij, dat zich een gigantische vuurbal vormde die tot ver in de stratosfeer reikte. Door de grote hitte werd ook veel gesteente verdampt en met de vuurbal meegevoerd. Die damp verspreidde zich vanuit het inslagpunt de atmosfeer in; bij het steeds verder uitzetten koelde de damp af, waarna gesteentedruppels werden gevormd die over de hele aarde uitregenden. De meeste bolletjes verweerden aan het aardoppervlak, waardoor de K/T-grens nu op de meeste plaatsen door een (verwerings)kleilaagje wordt gekenmerkt.

Ebel en Grossman hadden eerder samengewerkt aan onderzoek

(via computersimulaties) van meteorieten met mineralen die condenseerden uit de gaswolk waaruit 4,5 miljard jaar geleden de zon ontstond. Ze besloten de bij dat onderzoek opgedane ervaring te gebruiken voor nader onderzoek aan de spinel uit de bolletjes op de K/T-grens. Daarvoor maakten ze gebruik van chemische analyses van Kyte (Universiteit van California), die al had aangetoond dat de chemische samenstelling van die bolletjes op aarde varieert (in de Atlantische Oceaan bijvoorbeeld zijn ze duidelijk verschillend van die in de Stille Oceaan). Ook maakten ze gebruik van eerder werk van Jay Melosh (Universiteit van Arizona) en Elisabetta Pierazzo (Planetary Science Institute in Tucson), die hadden aangetoond dat de chemische samenstelling van de vuurbal die na de inslag ontstond, afhankelijk was van de hoek waaronder die inslag plaatsvond. Tenslotte combineerden ze die gegevens met werk van Mark Ghiorso (Universiteit van Chicago) en Richard Sack (Universiteit van Washington), die hadden vastgesteld dat bij een verticale inslag vooral materiaal uit de asteroïde en uit de diepe ondergrond van de aarde in de gaswolk wordt opgenomen, terwijl bij een inslag onder een kleine hoek juist vooral ondiep gesteente verdampt.

Op basis van deze gegevens gebruikten Ebel en Grossman hun computersimulaties om na te gaan hoe het verdampte gesteente als 'regen' zou neerslaan wanneer de temperatuur van de K/T-gaswolk (die duizenden graden Celsius moet zijn geweest) daalde. Uit de simulaties blijkt dat de lucht gevuld moet zijn geweest met 'regen' van een calciumrijke silicaatvloeiendstof die de chemische samenstelling van de gesteenten rondom de inslagkrater weerspiegelden.

Omdat de opstijgende vuurbal tijdens zijn uitzetting afkoelde, waren de condities tijdens het uitregenen niet overal gelijk: boven de Atlantische Oceaan was de temperatuur bijv. veel hoger dan boven de Stille Oceaan (die later door de vuurbal werd bereikt). De spinel die op beide plaatsen werd gevormd is volgens de computersimulatie dan ook verschillend van samenstelling. De chemische verschillen die uit de simulatie te voorschijn kwamen blijken precies overeen te komen met de verschillen die in werkelijkheid bestaan. Daarom moet nu wel worden aangenomen dat de bolletjes op de K/T-grens ontstonden door uitregening uit deze vuurbal, en dat ze niet een gevolg zijn van gedeeltelijke verdamping in de atmosfeer van de asteroïde, of van materiaal dat rechtstreeks afkomstig was van verdampt gesteente op de plaats van inslag.

Ebel, D.S. & Grossman, L., 2005. Spinel-bearing spherules condensed from the Chicxulub impact-vapor plume. *Geology* 33, p. 293-296.

A.J. van Loon