

# De Yellowstone vulkaan: verwoestend en scheppend tegelijk

door C. de Jong (redactie Gea)  
zomertaling@planet.nl

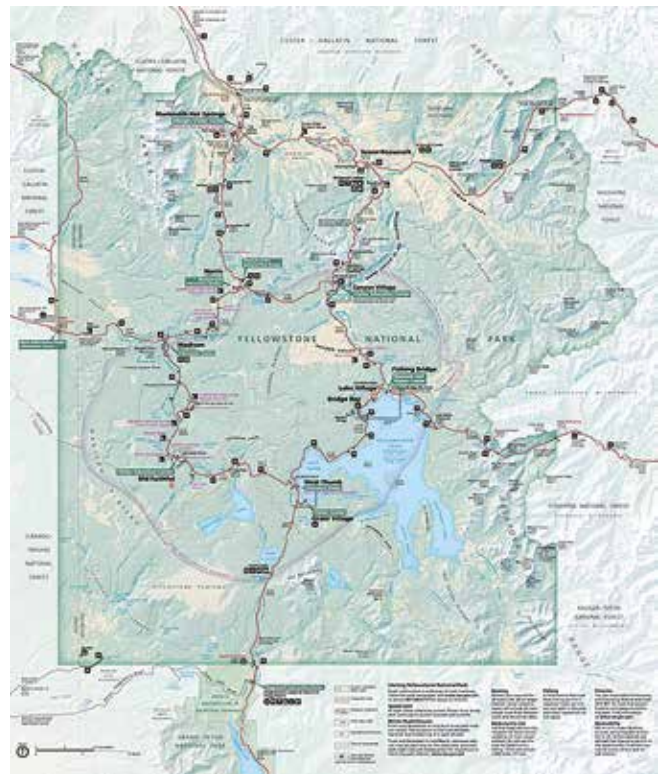
Vele jaren geleden zag ik een foto van de Grand Prismatic Spring, een prachtige veelkleurige heetwaterbron in het Yellowstone National Park. De hitte van een groot magmareservoir is de drijvende kracht achter tal van vulkanische verschijnselen. De heersende milieuomstandigheden maken allerlei primitieve levensvormen mogelijk. Die combinatie van leven en het potentiële gevaar, daar moest ik een keer naar toe en dat gebeurde in aug 2008.

Het Yellowstone National Park (YNP) is het eerste nationale park ter wereld, en werd in 1872 opgericht door president Ulysses Grant. Het park, hoofdzakelijk gelegen in de Amerikaanse staat Wyoming, heeft een oppervlak van 9000 km<sup>2</sup> en ligt op een plateau op grofweg 2400 m hoogte, omringd door bergen van meer dan 3000 m. Het park trekt jaarlijks miljoenen bezoekers (vier miljoen in 2015). Er zijn vijf toegangswegen en in het park zelf vormen de wegen een acht (afb. 1). Het wegennetwerk leidt de bezoeker langs de belangrijkste bezienswaardigheden, vooral de vele vormen van vulkanische activiteit: geisers, heetwaterbronnen, fumarolen en borrelende modderpoelen, maar ook het wildlife met o.a. beren, bizonen, herten en wolven. Overal in het park zijn bij de attracties houten vlonders gebouwd. Ze beveiligen niet alleen het bijzondere milieu van de heetwaterbronnen, maar ook de bezoeker.

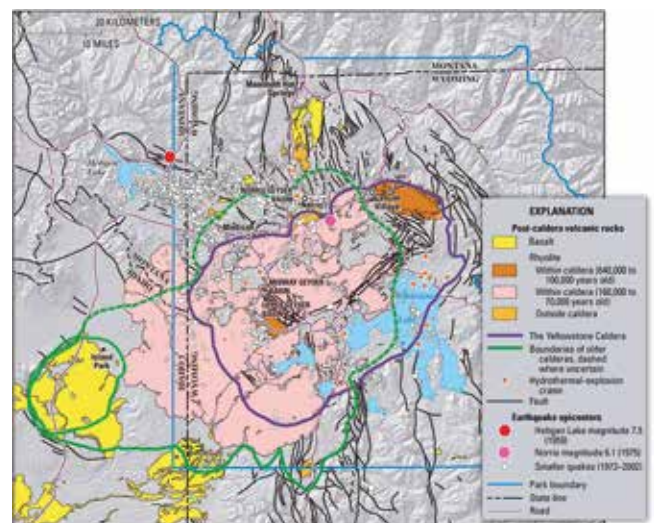
## De Yellowstone vulkaan

Het YNP bestaat voor een derde uit de caldera van de Yellowstone-vulkaan. De afgelopen 2,1 miljoen jaar hebben zich drie grote uitbarstingen voorgedaan, waarbij steeds een caldera werd gevormd (afb. 2). Deze drie erupties volgden alle hetzelfde patroon. Het eerste stadium begint met de langzame opheffing van de bodem doordat zich een grote hoeveelheid magma in de ondiepe ondergrond (5–8 km) verzamelt. Basaltisch magma, afkomstig uit de bovenmantel (de Yellowstone hotspot) dringt de korst binnen en reageert met het omringende gesteente tot rhyoliet. Het uitrekken van de aardkorst door de opbollende magmakamer veroorzaakt concentrische en radiale breuken aan het oppervlak. Dat leidt tot het uitvloeien van basalt en rhyoliet.

In het volgende stadium komt er door de steeds maar doorgroeiende magmakamer enorme druk op het hele systeem te staan. Dat leidt uiteindelijk tot explosief vulkanisme met enorme hoeveelheden rhyolietisch magma dat via de ringbreuken naar buiten komt met



▲ Afb. 1. Kaart van het Yellowstone National Park met de wegen (dunne rode lijnen) en de belangrijkste geologische en toeristische attracties. De gestippelde lijn geeft de omtrek van de huidige Yellowstone-caldera weer, die is ontstaan bij de uitbarsting van 640.000 jaar geleden. Bron: USGS.



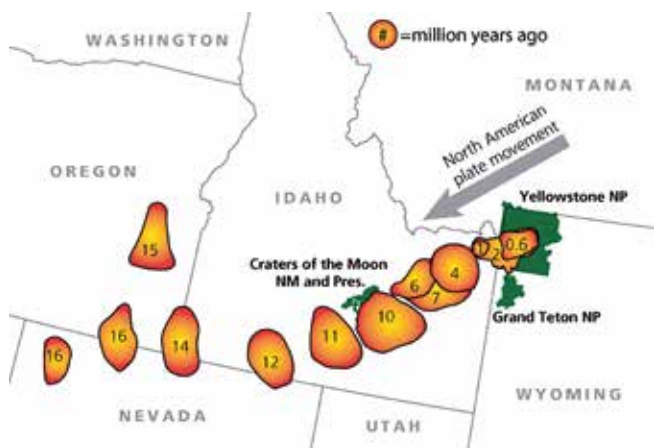
▲ Afb. 2. Vereenvoudigde geologische kaart van Yellowstone caldera. De paarse lijn geeft de omtrek van de huidige caldera weer. De groene doorgetrokken lijn links onder net buiten het YNP is de begrenzing van de caldera van 1,3 miljoen jaar geleden en de gestippelde groene lijn geeft de caldera van 2,1 miljoen jaar weer. Van de laatste grote uitbarsting dagzomen slechts enkele gesteenten (donkerbruin). De roze kleur geeft de verspreiding van de rhyoliet van later datum in de caldera weer. Bron: USGS.

de afzetting van tuffen en ignimbrieten (afb. 3). Deze erupties laten de magmakamer leeg achter, met als gevolg dat het 'dak' van de magmakamer instort langs dezelfde breuken waarlangs de erupties plaatsvonden. Bij de laatste uitbarsting van 640.000 jaar geleden ontstond er een caldera met een doorsnede van 55 x 75 km. Sinds die laatste caldera-vormende uitbarsting hebben zich vooral langs de randen tientallen kleinere erupties



▲ Afb. 3. Tuffen en basaltlava's van de 640.000 jaar oude Lava Creek Tuff in het dal van de Yellowstone River.

voorgedaan van dikke stroperige rhyolitische lava en meer vloeibare basalt die de caldera tussen 160.000 en 70.000 jaar geleden voor een groot deel weer hebben opgevuld. Door het opnieuw opvullen van de magma-kamer neemt de druk weer toe, wat weer tot opheffing leidt. Dit gaat gepaard met honderden kleine aardbevingen per jaar. In dit laatste stadium manifesteert het vulkanisme zich echter vooral door hydrothermale activiteit, o.a. met geisers. Vanwege al die vulkanische verschijnselen wordt ook wel gesproken van het Yellowstone Vulkanisch Systeem.



▲ Afb. 4. De Noord-Amerikaanse plaat schuift in zuidwestelijke richting over de Yellowstone hotspot, wat een hele serie vulkanische afzettingen tot gevolg heeft gehad.

### Platentektoniek

De twee andere grote uitbarstingen van het Yellowstone vulkanisch systeem vonden resp. 1,3 en 2,1 miljoen jaar geleden plaats. Bij de oudste van deze erupties werd naar schatting 2450 km<sup>3</sup> magma in de vorm van vulkanisch as en puimsteen de lucht ingeblazen. Die bedekten ruwweg de helft van het huidige oppervlak van de Verenigde Staten. Er ontstond een caldera van 100 km doorsnede. Ter vergelijking, de krachtigste uitbarsting van de laatste eeuwen, de Tambora eruptie van 1815, op het Indonesische eiland Soebawa, was slechts

50 km<sup>3</sup> groot. Het was overigens een uitbarsting die het klimaat wereldwijd zo sterk beïnvloedde dat overal ter wereld oogsten verloren gingen en er hongersnoden optraden tot in Europa aan toe. Ook de twee latere Yellowstone-uitbarstingen zorgden voor de vorming van een caldera en enorme volumes aan uitgestoten materiaal. Dat er bij dergelijke explosies zoveel materiaal de lucht in gaat, komt door de eigenschappen van het rhyolitisch magma. Dat heeft een hoge viscositeit, d.w.z. is taai, kleverig en rijk aan gasbelletjes. Bij het opstijgen van het magma in de korst neemt de druk af en het uitdijende gas zorgt voor een explosieve eruptie.



▲ Afb. 5. De Grand Prismatic Spring in het Midway Geysir Basin. Hij wordt gevoed door het door breuken en spleten in het onderliggende gesteente opborrelde hete water. Er komt zo'n 2000 liter/min omhoog, dat wegstroomt via zijkanalen naar de Firehole River. De blauwe kleur in het midden van de bron wordt veroorzaakt door de verstrooiing van het zonlicht door in het water aanwezige deeltjes. De andere kleuren duiden op de aanwezigheid van cyanobacteriën. Die kleuren representeren ieder een andere soort en tegelijk zegt het iets over de watertemperatuur. *Calothrix* (bruin): 30-45 °C; *Phormidium* (oranje): 35-57 °C; *Synechococcus* (groen): 52-74 °C

De drie caldera's overlappen elkaar gedeeltelijk, zie afb. 2. Die van 1,3 miljoen jaar geleden ligt net buiten de zuidwest hoek van het park. Doordat het Amerikaanse continent in zuidwestelijke richting over de Yellowstone hotspot schuift (afb. 4) zijn er verdergaand in zuidwestelijke richting nog meer en steeds oudere vulkanische afzettingen van deze hotspot te vinden, m.a.w. de Yellowstone hotspot is al veel ouder dan die 2,1 miljoen jaar. Die is al zeker 30 miljoen jaar actief. De bewijzen daarvoor liggen in de staten ten zuidwesten van het YNP. Ik beperkt me in dit artikel tot wat ik heb gezien in het park.

### Hydrothermale activiteit

Water – regen of sneeuw – dringt door in de bodem, waar het wordt opgewarmd door de nog aanwezige warmte van de rhyoliet en de op 5 km onder het aardoppervlakte liggende magmahaard, die een temperatuur van minstens 800 °C heeft. In kleinere en grotere hol-



▲ Afb. 6. Castle Geysir in het Upper Geysir Basin, YNP. In tegenstelling tot de klassieke geysir heeft deze een nauwe opening. Rondom de opening is een "kasteel" opgebouwd van geysieriet.



▲ Afb. 7A. Overzicht van de Old Faithful in het Upper Geysir Basin, YNP. De geysir spuit met tussenpozen van 40 tot 126 minuten. In de gebouwen is het Old Faithfull Visitors Center gevestigd. Daar is volop informatie voorhanden o.a. wat de verwachte tijden van de uitbarstingen van de verschillende geysirs in het Upper Geysir Basin zullen zijn.



▲ Afb. 7B. De Old Faithful geysir in eruptie.

ten, spleten en gangen in het poreuze gesteente wordt het water tot kooktemperatuur opgewarmd, wat tot die verschillende vormen van vulkanische activiteit leidt. Het water in heetwaterbronnen varieert van lauwwarm tot kokend heet. In die bronnen vindt een voortdurende circulatie plaats van wat kouder water aan het oppervlak dat zinkt, weer opwarmt en opstijgt. In het Midway Geysir Basin komen alleen warmwaterbronnen voor, zoals de beroemde Grand Prismatic Spring (afb. 5). Met een doorsnede van 61 m is het de grootste heetwaterbron van YNP, met een watertemperatuur van ca 70 °C en één van de grootste op aarde.

### Geysers en andere vulkanische verschijnselen

Geysers zijn er in twee soorten. Er zijn geysers die aan het aardoppervlak een soort klein vulkaantje (afb. 6) vormen als het mondstuk van een tuinslang. Dat 'mondstuk' bestaat uit geysieriet (amorf  $\text{SiO}_2$ ), dat wordt gevormd doordat het hete water in de diepte silicium oplost en meevoert omhoog en dat bij de uitbarsting rondom de opening neerslaat. De tweede is de zogeheten fonteingeysir, zoals de Old Faithful (afb. 7A&B). Daarbij is de opening veel breder en ziet het eruit als een gewone heetwaterbron. Bij een heetwaterbron blijft het waterniveau echter gelijk, terwijl bij de fonteingeysir het water rijst, daalt en rijst en ten slotte plotseling omhoog spuit. In het YNP komen in het Upper Geysir Basin beide soorten geysers voor.



▲ Afb. 8. Overzicht van het Norris Geysir Basin. Vanaf het houten wandelpad in de linker bovenhoek zijn de foto's van de eencelligen genomen, zie afb. 14, 15 en 16.



▲ Afb. 9. Borrelende, kokende heetwaterbron.



▲ Afb. 10. Bij deze borrelende modderpoel met een doorsnede van ±1 m. hangt de lucht van rotte eieren, afkomstig van de zwavel (H<sub>2</sub>S). In dit soort gloeiend hete modderpoelen is het bestaan van Sulfobolus aangetoond. Het oxideert zwavel tot zwavelzuur dat het omringende gesteente aantast en modder vormt.



▲ Afb. 11. Een van de poelen in Mud Volcano gebied.

In het hoger gelegen Norris Geyser Basin (afb. 8) zijn nogal wat fumarolen te zien. In de ondergrond is onvoldoende water aanwezig om een geiser te vormen. Het aanwezige kokende water (afb. 9) produceert alleen stoom, dat samen met andere in het water aanwezige gassen aan het oppervlak ontsnapt. Daarom wordt een fumarole ook wel een stoomgat genoemd. Modderpoelen zijn te beschouwen als een bijzondere soort fumarole. Het hier opstijgende gas vormt samen met oppervlaktewater en het daarin aanwezige organisch materiaal agressieve zuren die het omringende gesteente afbreken. Het resultaat is een grijze brij van borrelende klei (afb. 10 & 11). Kenmerkend voor dit soort verschijnselen is de lucht van rotte eieren (H<sub>2</sub>S), afkomstig van het in de modderpoelen aanwezige zwavel. De locatie Mud Volcano in YNP bestaat uit een flink aantal modderpoelen met wisselende activiteit. Hier komen een aantal breuken in de ondergrond bij elkaar waar zich relatief veel kleine aardbevingen voordoen. Die worden veroorzaakt door het langzaam uitzetten en ook weer inzakken van de onderliggende magma-haard. De bodem erboven beweegt navenant, niet meer dan enkele centimeters.

In de noordwesthoek van het YNP maar buiten de caldera ligt Mammoth Hot Springs, een hele serie heetwaterbronnen op een heuvel van travertijn. Het hete water is afkomstig van het veel zuidelijker gelegen Norris Geyser Basin en stroomt via breuken in de ondergrond naar Mammoth Hot Springs. Onderweg stroomt het water door kalken waar het wat van oplost en meeneemt naar de Mammoth Hot Springs. In het afkoelende water slaat de kalk neer en vormt zo de travertijn terrassen (afb. 12 & 13).



▲ Afb. 12. Heet water dat door kalklagen opborrelt, lost een deel van de kalk op wat aan het oppervlak weer neerslaat: travertijn. Mammoth Hot Springs, dat ruim buiten de caldera ligt vormt enorme travertijnterrassen. Toch gelooft men dat dezelfde magma-aard de warmte levert voor dit verschijnsel.



▲ Afb. 13. Van boven kijkend op de met thermofielen bevolkte heetwaterbronnen van Mammoth Hot Springs. De terrassen breiden zich voortdurend uit. Ooit buiten de terrassen groeiende bomen worden ingekapseld door de heetwaterbronnen, gekookt en gaan dood. De draadvormige cyanobacterie *Spirulina* is beter tegen de omstandigheden bestand. Het vormt hele ketens, platte plakken en matten. Dit organisme leeft van het waterstofsulfide, dat vanuit de diepte mee omhoog komt.

## Hydrothermale explosiekraters

Op een diepte waar een hogere druk heerst, kan de watertemperatuur veel hoger zijn dan die van kokend water aan het oppervlak, zonder dat het kookt. Bij een boring in het Norris Geyser Basin bleek de watertemperatuur op 332 m onder het oppervlak 238 °C te zijn. Wanneer het water op zekere diepte toch gaat koken, doordat bijvoorbeeld de druk afneemt, ontstaat waterdamp. Die duwt de waterkolom erboven omhoog, waardoor de druk weer verder afneemt, meer water gaat koken, meer waterdamp wordt gevormd, en uiteindelijk zorgt voor fontein van water en stoom, zoals bijv. de beroemde geiser Old Faithful.



▲ Afb. 14. Draadvormige cyanobacteriën, mogelijk *Synechococcus*, vormen soms hele tapijten in de afvoerstroompjes van de heetwaterbronnen.



▲ Afb. 15. Uit de Whirligig Geiser in het Norris Geiser Bekken stroomt warm tot heet water met verschillende kleuren, die door eencellige organismen worden veroorzaakt. De groene kleur is afkomstig van de alg *Cyanidium*. Deze algensoort leeft in een zuur milieu, bij een temperatuur tussen 38-56 °C. Meerdere exemplaren vormen samen lange draden en die vormen met elkaar hele matten.

Nergens op de wereld zijn zoveel geisers als in Yellowstone. In het YNP hebben zich ook veel grotere hydrothermale explosies voorgedaan. Die werden veroorzaakt door het plotseling veranderen of wegvallen van de druk. Daarbij gaat water onmiddellijk koken en verandert het in stoom, wat door de snelle volumever-

groting een explosie veroorzaakt. Dergelijke hydrothermale explosies, waarbij ook meters grote blokken steen de lucht in worden geworpen, hebben zich vooral voorgedaan tussen 14.000 en 3.000 jaar geleden, met aanzienlijke kraters tot gevolg, waarvan de grootste 2,6 km in doorsnede is.

## Thermofielen

In deze voor mensen en de meeste andere organismen zeer vijandige heetwaterbronnen leven zogenaamde thermofielen, liefhebbers van heet water. De meest extreme behoren tot de groep van de Archaea, eencellige organismen zonder celkern (Prokaryota) en met een zeer stevige celwand, die hen beschermt tegen de zeer zure omstandigheden in het hete water. Eén van die soorten is *Sulfolobus*, die temperaturen van water en modder kan verdragen tot maar liefst 90 °C en een hoge zuurgraad (pH=0-4). Onderzoekers menen dat evolutie onder dergelijke omstandigheden weinig kans maakt en dus verschillen deze moderne Archaea niet veel van hun vroegste voorouders van miljarden jaren geleden. Onderzoekers van ander planetair leven associëren dit soort levensvormen met buitenaards leven, bijv. op Mars. *Sulfolobus*, geel tot crèmekleurig, wordt o.a. aangetroffen in Mud Volcano en in het Norris Geiser Basin.

## Cyanobacteriën

Behalve Archaea komen in de heetwaterbronnen verschillende soorten bacteriën voor, die onder minder extreme omstandigheden leven (in een minder zuur



▲ Afb. 16. De roodgekleurde, met roest bedekte organismen, leven bij watertemperaturen van 50-60 °C en gebruiken ijzer uit het ijzerrijke water als energiebron.



▲ Afb. 17. Grand Canyon van de Yellowstone River ingesleten in de Sulphur Creek Tuff. Deze vulkanische afzetting met een maximale dikte van 80 m is ontstaan na het instorten van de caldera. De gele kleur van het gesteente is het gevolg van hydrothermale verandering van ijzermineralen.

milieu en bij lagere temperaturen). Dit is nog steeds te heet voor andere organismen. Sommige bacteriën doen aan fotosynthese, het omzetten van zonlicht in energie en zuurstof, terwijl andere soorten hun energie halen uit chemosynthese, waarbij energie niet uit zonlicht, maar uit chemische reacties wordt verkregen. De gele, oranje en bruine kleuren langs de randen van de heetwaterbronnen en hun afvoerstroompjes zijn afkomstig van cyanobacteriën, m.n. *Phormidium* en *Calothrix* (afb. 5). Deze soorten leven in water met temperaturen van resp. 35–57 °C en 30–45 °C. Ook de groene en roodoranje kleuren in de afvoerstroompjes van de Whirligig Geysir komen van twee verschillende soorten bacteriën die bij verschillende watertemperaturen leven (afb. 14, 15 & 16).

### Het monitoren van de vulkaan

Er lijkt een grof ritme te zitten in het optreden van de uitbarstingen. Op basis van de laatste drie zou je haast verwachten dat er binnenkort weer zo'n giga-eruptie moet komen. De vulkaan wordt daarom continu gemonitord. Met GPS wordt de bodembeweging in

de gaten gehouden. Tussen 2004 en 2010 werd bij het GPS-station aan de oostelijke binnenzijde van de caldera een stijging van 27 cm gemeten. Die stijging werd veroorzaakt door de beweging van hydrothermale vloeistoffen of gesmolten gesteente in het op ongeveer 10 km diepte liggende magmalichaam. Sindsdien zakt de bodem weer in. Dat op en neer bewegen van de bodem van de caldera kan duizenden jaren doorgaan zonder dat het tot een eruptie komt. Deze bewegingen gaan wel gepaard met aardbevingen. Wanneer het magma weer zou stijgen, zouden er meer aardbevingen moeten worden waargenomen, wat niet het geval is. Ook wordt de temperatuur en samenstelling van het gas bij hydrothermale bronnen in de gaten gehouden. Het lijkt er echter niet op dat een uitbarsting zich de komende duizenden jaren weer zal voordoen. Verwacht wordt dat het huidige patroon, met af en toe uitstromende lava en asregens van kleinere erupties, zich zal doorzetten. Afb. 17.

*Foto's van de auteur, tenzij anders vermeld.*