

gesimuleerd, waarbij de gegevens die bekend werden na de uitbarsting van de Pinatubo in 1991 als invoermateriaal zijn gebruikt. Deze uitbarsting werd gekozen omdat de chronologie ervan zeer gedetailleerd is gedocumenteerd en omdat de samenstelling van het uitgeworpen materiaal nauwkeurig is geanalyseerd.

Op basis van hun experimenten komen de onderzoekers tot de conclusie dat, als in de magmahaard verschillende soorten magma aanwezig zijn, het zware materiaal - zoals verwacht - op de bodem wordt geconcentreerd. Wanneer vervolgens magma opstijgt via een spleet in de aardkorst of via een kraterpijp, dan wordt in de zone daaronder een onderdruk gecreëerd. De proeven geven aan dat dan gemakkelijker materiaal van onderen dan van de zijkanten wordt aangezogen. De kennelijk betrekkelijk geringe hoeveelheid relatief zwaar magma van de bodem van de magmahaard wordt door dit proces het eerst uitgeworpen. Er ontstaat in de magmahaard dus als het ware een pluim van zwaar, basisch magma in het lichtere, zuurdere magma. Doordat bij het 'opzuigen' materiaal van de zijkanten kan worden meegesleurd, kan de aanvankelijk uitstromende lava ook een gemengd karakter hebben. Pas wanneer het zware materiaal min of meer is opgesoupeerd, volgt de grote massa van het lichtere magma.

Snyder, D. & Tait, S., 1996. Magma mixing by convective entrainment. *Nature* 379, p. 529-531.

A.J. van Loon

GEOCOMpositie 2

Samenstelling van nieuwe aardkorst hangt samen met eigenschappen van zeewater in subductiezones

Subductiezones, waar de ene schol van de lithosfeer onder de andere wegschuift als gevolg van het patroon van convectiestromen in de aardmantel, worden gekenmerkt door diepzeetroggen en door eilandenbogen (Japan is een karakteristiek voorbeeld). De eilandenbogen ontstaan doordat, als gevolg van de wrijvingswarmte en de met de diepte toenemende temperatuur, delen van de omlaag wegschuivende schol worden omgevormd tot magma. Langs zwaktezones kan dat magma omhoogdringen, waarbij het in de vorm van lava door vulkanen aan het aardoppervlak wordt uitgestoten, in een patroon dat eilandenbogen oplevert. In werkelijkheid is het proces natuurlijk veel ingewikkelder dan het hierboven ruw geschetste model. Zo heeft de uitstromende lava gewoonlijk een andere chemische samenstelling dan de 'opgesoupeerde' aardkorst: het is in het algemeen veel sterker kalkalkalisch. Er moet dus een proces optreden dat een zekere differentiatie binnen het magma teweegbrengt. Volgens experimenteel onderzoek van de Universteit van Bayreuth speelt het bij de

subductie 'begraven' zeewater daarbij de belangrijkste rol. Het in subductiezones verdwijnende zeewater zit voor een groot deel opgesloten in de nog onverharde bodemsedimenten, maar ook in poriën in reeds gelithificeerde gesteenten. Uiteindelijk komt het bij de vulkanische processen weer naar buiten, deels in de vorm van waterdamp. Intussen zorgt het water voor een ruimtelijke differentiatie van elementen in het magma, waardoor nieuwe aardkorst, die uit het magma ontstaat, onder meer gekenmerkt wordt door relatief weinig cerium, thorium-230, niobium en tantalium, en juist relatief veel lood, uranium-238, rubidium en titaan. De uitgevoerde experimenten waren indirect gericht op het vaststellen van het gedrag in de (niet direct experimenteel reproduceerbare) situatie van lithosfeerschollen die tot in de aardmantel wegschoven. Dit werd gedaan door in een gesloten systeem met een vloeistof en met een silicaatsmelt (als vertegenwoordiger van magma) te kijken naar de onder diverse omstandigheden optredende differentiatieprocessen. Omdat voor ieder element het gedrag in een gesloten systeem met vaste stof (mineralen) en smelt (magma) bekend is, kon zo worden berekend wat het gedrag moest zijn in een systeem met vloeistof (water) en vaste stof (mineralen). Uit dit experiment bleek, dat water de vloeistof is die het duidelijkst bijdraagt aan de differentiatie tussen de elementen in de vloeistof en die in de mineralen; dit geldt vooral als het water rijk is aan chloriden. Dat is een voorwaarde waaraan gemakkelijk wordt voldaan: het chloor uit het omlaag gevoerde zeewater bindt zich aanvankelijk weliswaar snel met andere elementen tot mineralen die kristalwater bevatten, maar bij diepere begraving worden deze instabiel en komen chloriden vrij, waarbij door selectieve complexvorming met sporenelementen een differentiatie binnen het systeem ontstaat. Overigens is nog niet geheel duidelijk of het in hoofdzaak de chloriden zijn die, via complexvorming, bijdragen aan de differentiatie, of dat het vooral gaat om de hoeveelheid opgeloste stoffen in het water. Het onderzoek ondersteunt de theorie dat de continenten vooral aangroeien door magma dat vanuit de aardmantel opstijgt in eilandenbogen. Er zijn echter nog meer mogelijke implicaties: het zou de aanwezigheid van water, en van de daarin opgeloste stoffen, zijn waardoor de samenstelling van nieuwe aardkorst wordt bepaald. Omgekeerd is het waarschijnlijk dat de samenstelling van de aardkorst in 'fossiele' eilandenbogen een weerspiegeling vormt van de toenmalige samenstelling van het zeewater. Het is daarom wellicht mogelijk om aan de hand van de samenstelling van geschikte gesteenten de veranderingen van het oceaanwater in de loop van de geologische tijd te reconstrueren, evenals het moment waarop het zeewater ongeveer zijn huidige samenstelling bereikte.

Keppler, H., 1996. Constraints from partitioning experiments on the composition of subduction-zone fluids. *Nature* 380, p. 237-240.

Plank, T., 1996. The brine of the earth. *Nature* 380, p. 202-203.

A.J. van Loon

Vulkanisme op Hawai'i:

een verhaal over hete voeten en kapotte zolen...

door Jeff Haspels *)

"Jets of lava sprung hundreds of feet into the earth in a crimson rain; and all the while the laboring mountain shook with Nature's great palsy, and voiced its distress in moanings and the muffled booming of subterranean thunders." - Mark Twain

"The loveliest fleet of islands that lies around anchored in any ocean" - Mark Twain

*) Jeffrey Haspels heeft (endogene) geologie gestudeerd aan de Vrije Universiteit en is momenteel werkzaam bij Clyde Petroleum Exploratie in Den Haag.

Denkend aan vulkanen, denk ik aan Japan, Indonesië of aan IJsland. Niet direct aan Hawai'i, het hoofdeiland van de gelijknamige eilandengroep middenin de grote oceaan. Toch is juist dát eiland gezegend met twee bijzondere vulkanen, namelijk Mauna Loa - de grootste vulkaan ter wereld -, en Kilauea - de actiefste vulkaan ter wereld. De laatste is al sinds januari 1983 vrijwel onafgebroken in uitbarsting en is waarschijnlijk de meest intensief bestudeerde vulkaan ter wereld. Dat komt onder meer omdat hier het Hawaiian Volcano Observatory (HVO) is gevestigd: een permanent observatorium dat deel uitmaakt van de Amerikaanse geologische dienst (USGS) en één van de toonaangevende onderzoekscentra op het gebied van vulkanologie.

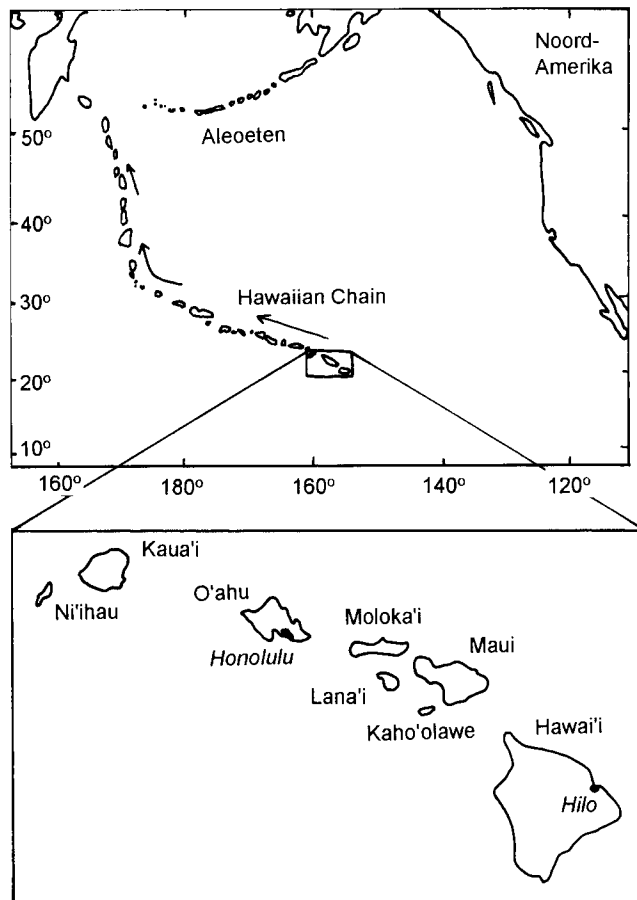
Op initiatief van twee studenten is er drie jaar geleden een intensief contact tot stand gekomen tussen het HVO en de Faculteit der Aardwetenschappen van de Vrije Universiteit. Dit heeft ertoe geleid dat ieder jaar twee studenten de gelegenheid hebben om drie maanden stage te lopen op deze exotische en vooral interessante en spectaculaire plek. Vandaar mijn betrokkenheid met Hawai'i.

Introductie

Hawai'i is het zuidelijkste eiland van een archipel die zich uitstrekt over een groot deel van de Stille Oceaan (afb.1). De archipel begint in het noorden bij de Aleoeten en loopt dan - eerst in zuidelijke richting, vanaf ongeveer halverwege in zuidoostelijke richting - helemaal door tot ongeveer 20° Noorderbreedte. In totaal bestaat de archipel uit ongeveer 80 eilanden, hoewel de meeste slechts atollen of *sea-mounts* zijn. Eigenlijk alleen de meest zuidoostelijke eilanden van de archipel steken nog boven het wateroppervlak uit en hiervan zijn de meeste bewoond. In totaal gaat het hier om zo'n 8 eilanden die binnen een afstand van ongeveer 600 kilometer van elkaar op ongeveer 10° NB liggen. De eilanden liggen zo ongeveer op de meest geïsoleerde plaats ter wereld: vanaf de Amerikaanse westkust is het ongeveer 6 uur vliegen naar het economische centrum Honolulu op Oahu en vanaf Japan zo'n 4½ uur. In zowel noordelijke als zuidelijke richting kom je eigenlijk geen land meer tegen tot aan de polen.

De afgelegen ligging van de archipel heeft ertoe geleid dat de eilanden relatief onbewoond zijn gebleven: de eerste bewoners arriveerden er pas rond 600 na Chr. vanuit Polynesische gebieden verder naar het zuiden en de eerste blanke (Thomas Cook) kwam hier pas in 1778. De afgelegen ligging van de eilanden en de afwezigheid van menselijke bewoning hebben ertoe geleid dat er zich een bijzondere natuur heeft kunnen ontwikkelen. Zo komen er op Hawai'i duizenden bloemen, planten en dieren voor die nergens anders te vinden zijn. Een voorbeeld hiervan is de *nene*, een soort gans die zich speciaal heeft ontwikkeld om over de scherpe, verse lava te kunnen lopen. Overigens zijn er tegenwoordig nog maar zo'n 300 nene over. De komst van de blanken - en vooral de dieren die ze meebrachten - hebben het evenwicht van het ecosysteem ernstig verstoord. Vooral zwijnen, geiten en de *mongoose* (een soort wezel) vormen een grote bedreiging voor de endemische flora en fauna. Inmiddels zijn er dan ook de afgelopen 200 jaar veel soorten uitgestorven.

Het klimaat op de eilanden wordt vooral bepaald door de combinatie van passaatwinden, komend vanuit het oosten, en de topografie van de eilanden. Ik heb me laten vertellen dat er op aarde rond de 35 verschillende klimaatzones bestaan, waarvan er alleen al op het hoofdeiland 18 voorkomen, variërend van tropische regenwouden tot woestijnen en alpiene gebieden. In principe komt het erop neer dat de vochtige oceaanlucht, die met de passaatwinden wordt meegevoerd, gedwongen wordt op te stijgen door de opgeworpen hindernis, waardoor hij afkoelt en minder vocht kan bevatten. Dit vocht daalt vervolgens in de vorm van regen (en soms sneeuw!) op de aarde neer. Grofweg betekent dit dat er aan de oostkant van de eilanden meer neerslag valt dan aan de westkant: in Hilo (aan de oostkant van het hoofdeiland)



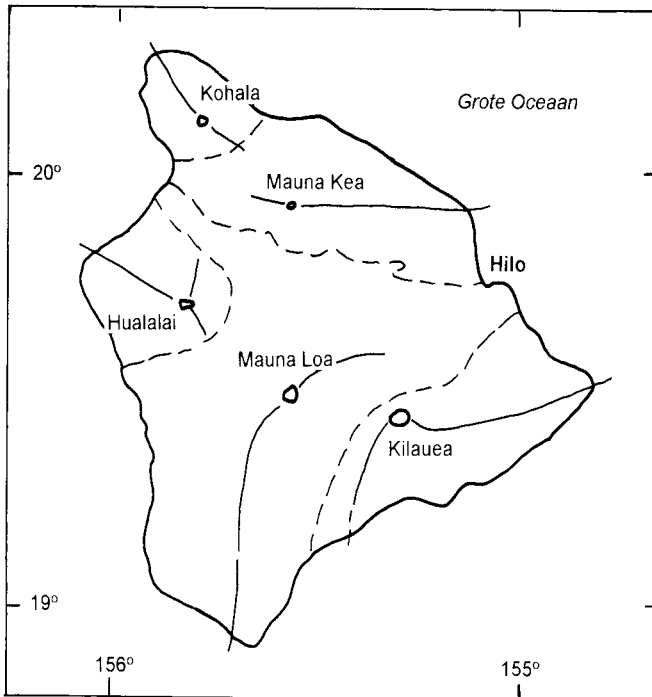
Afb. 1. Ligging van de Hawaiian Chain in de Stille Oceaan. De archipel strekt zich uit over een lengte van een paar duizend kilometer.

regent het dan ook bijna dagelijks, terwijl in Kona (aan de westkant) 360 dagen per jaar de zon schijnt. Hier bivakkeert dan ook het overgrote deel van de toeristen. Op het meest noordelijke bewoonde eiland, Kauai, is zelfs de natste plek ter wereld met 12 meter regenval per jaar! Dat totaal verschillende klimaten zich op heel korte afstand van elkaar kunnen bevinden, kwam trouwens al tot uitdrukking in mijn hardloopronde van ongeveer 8 kilometer, dat zowel door tropisch regenwoud als door een woestijnachtige omgeving liep (en waarschijnlijk ook alles ertussenin).

Geologische setting en vulkanisme

De meeste vulkanen bevinden zich in twee verschillende geologische regimes. De eerste groep, waartoe bijvoorbeeld de vulkanen op IJsland behoren, is geassocieerd met zogenaamde **divergente** (van elkaar af bewegende) plaatgrenzen. Ten gevolge van convectorie in de mantel bewegen hier de Noord-Amerikaanse en de Eurasische plaat zich met een snelheid van een paar centimeter per jaar uit elkaar. Hierbij smelt de bovenmantel gedeeltelijk op en ontstaat er een rij van voornamelijk onderzeese vulkanen met een basaltische samenstelling. De andere belangrijke groep van vulkanen is voor een groot deel gelegen in een kring rondom de Grote Oceaan. Deze *Ring of Fire* loopt via de Filippijnen, Indonesië en de Aleoeten naar de Andes en is geassocieerd met **convergente** (naar elkaar toe bewegende) plaatgrenzen. In Japan subduceert bijvoorbeeld de Pacificse plaat onder de Eurasische plaat en andesitisch vulkanisme is het gevolg.

De basaltische vulkanen op Hawai'i zijn echter duizenden kilometers verwijderd van enige divergente of convergente plaatgrens en behoren dan ook tot een aparte groep. Al in de vorige eeuw was bekend, dat de eilanden van de Hawaïaanse archipel successievelijk ouder worden in noordwestelijke richting (afb.1). In feite werd deze constatering één van de sterkste aanwijzingen



Afb. 2. De vijf vulkanen op het hoofdeiland: Kohala, Mauna Kea, Hualalai, Mauna Loa en Kilauea. SWRZ: South West Rift Zone van de Kilauea-vulkaan; ERZ: East Rift Zone.

voor de theorie van plaattektoniek in de jaren '60: Hawai'i was blijkaar gelegen boven een stationaire magmabron in de mantel en de oudheidsverschillen voor de verschillende eilanden waren niets anders dan een reflectie van de beweging van de Pacificische plaat over deze warmtebron. Ziehier de geboorte van de plaattektoniek! Tegenwoordig zijn er meer dan 100 verschillende hot spots bekend. De vulkanen die boven zulke hot spots gelegen zijn, worden gevoed door paddestoelachtige mantle plumes, die met een snelheid van 10-20 cm per jaar door de mantel heen naar boven toe bewegen. Waarschijnlijk ontstaan deze mantle plumes op de grens tussen kern en mantel op zo'n 2900 kilometer diepte en vormen ze het belangrijkste mechanisme voor de afkoeling van de kern.

In tegenstelling tot bewegende platen verandert de positie van mantle plumes niet in de tijd. Zo vormen hot spots referentiepunten voor de bepaling van de snelheid waarmee en de richting waarin de verschillende platen bewegen. De Pacificische plaat beweegt dus op dit moment in noordwestelijke richting in vergelijking met de Hawaïaanse hot spot, met een snelheid van ongeveer 10 cm per jaar en kennelijk is er zo'n 40 miljoen jaar geleden een verandering in de bewegingsrichting opgetreden! De beweging van de Pacificische plaat is ook op kleinere schaal te zien. Zo bestaat het hoofdeiland, Hawai'i, uit vijf schildvulkanen: Kohala, Mauna Kea, Hualalai, Mauna Loa en Kilauea (afb. 2). Kohala - in het noordwesten - is de oudste en, net als Mauna Kea, niet meer actief; Kilauea - in het zuidoosten - is de jongste en de actiefste. Mauna Kea is de hoogste top van het eiland met een hoogte van ruim 4200 meter, Mauna Loa is goede tweede met 4169 m. Gemeten vanaf de zeebodembodem zijn beide vulkanen bijna 10 kilometer hoog en Mauna Loa is zelfs de grootste bergmassa ter wereld, met een volume dat gelijk is aan dat van de gehele Sierra Nevada in Californië!

Geologie van Kilauea en Mauna Loa

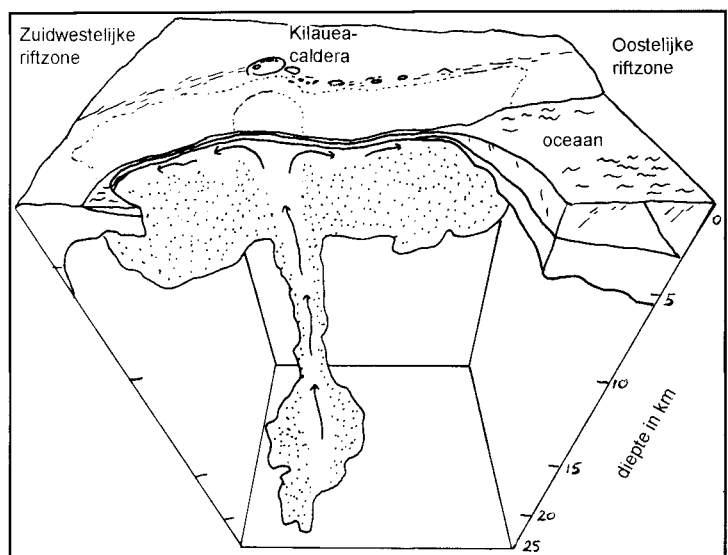
Kilauea en Mauna Loa zijn de enige vulkanen op het eiland die deze eeuw actief zijn geweest en ze maken beide deel uit van Hawai'i Volcanoes National Park. De opbouw en structuur van

beide vulkanen zijn goed bekend en voor een groot deel vergelijkbaar. Afb. 3 is een drie-dimensionale voorstelling van Kilauea. Zowel Kilauea als Mauna Loa hebben een langgerekte vorm en geleidelijk aflopende hellingen, typerend voor (basaltische) schildvulkanen. Beide hebben daarnaast een zogenaamde summit caldera (met een diameter van enkele kilometers), waarvandaan zich twee breuk- of rift-zones uitstrekken in grofweg oostelijke en zuidwestelijke richting. Het ontstaan van de caldera's is niet goed bekend. Mogelijk is dat Kilauea's caldera al is ontstaan tijdens de beginfase van de opbouw van de vulkaan. Duidelijk is in ieder geval wel dat de omvang van de caldera gedurende de afgelopen 200 jaar sterk veranderlijk is geweest. In het centrum van Kilauea's caldera bevindt zich (op dit moment) de krater Halema'u ma'u. Ook hiervan is de omvang en het voorkomen veranderlijk en worden periodes van intense vulkanische activiteit afgewisseld met relatief rustige periodes. De riftzones, die zich vanuit de summit caldera's van Kilauea en Mauna Loa uitstrekken, zijn zwakke zones in de vulkaan en, net als de caldera, plekken waar erupties plaatsvinden. Kilauea's huidige eruptie vindt plaats aan de oostelijke riftzone. De centrale magmakamer van Kilauea bevindt zich op een diepte van 2 tot 7 kilometer onder de summit caldera. Deze magmakamer is gevuld met magma, dat al op een diepte van zo'n 80 kilometer begint op te smelten en langzaam omhoogbeweegt. De cirkeltjes die op afb. 2 staan aangegeven zijn aardbevingen, die samenhangen met deze bewegingen in de ondergrond. Een ander deel van de aardbevingen vindt op veel geringere diepte plaats en wordt onder meer veroorzaakt doordat het magma zich vanuit de centrale magmakamer in de richting van een van de twee riftzones verplaatst.

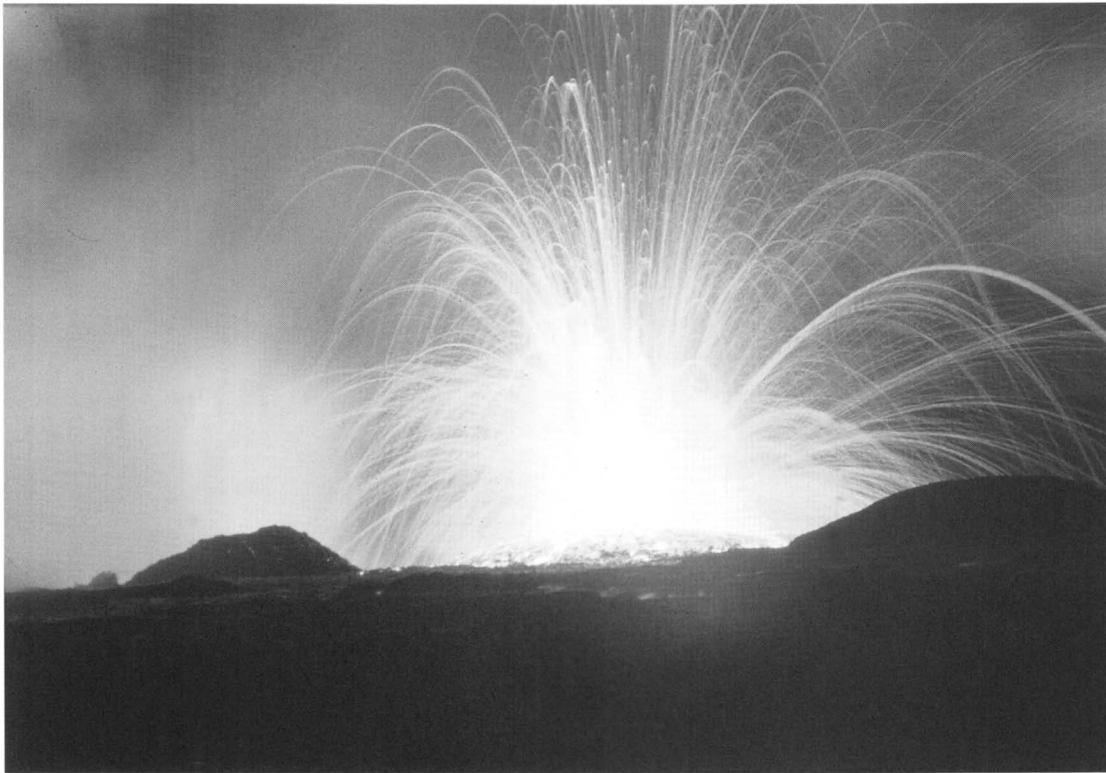
Kilauea is één van de actiefste vulkanen ter wereld. In totaal is meer dan 90% van het oppervlak in de afgelopen 1000 jaar bedekt met lava. De laatste 50 jaar heeft de meeste activiteit in de oostelijke riftzone plaatsgehad. De laatste eruptie langs de zuidwestelijke riftzone vond plaats in 1974 en de laatste summit eruptie in 1982. Sindsdien is praktisch alle activiteit aan de oostelijke riftzone geweest. Ook naar volume gemeten staat deze op de eerste plaats: exclusief de huidige eruptie is 75% van het totale lavavolume van de afgelopen decennia afkomstig van de oostelijke riftzone (inclusief zelfs meer dan 90%).

De huidige eruptie

De huidige eruptie is sinds 1983 aan de gang, maar is sindsdien erg wisselend van karakter geweest. Zo werd het verloop gedurende de eerste drie jaar gekenmerkt door afwisselende periodes



Afb. 3. Drie-dimensionale doorsnede door Kilauea. Magma stijgt op in een centrale zone en verplaatst zich vervolgens naar één van de twee riftzones.



Afb. 4.
Spectaculaire
taferelen aan
het eind van
de lavatunnel.
(Foto J.
Haspels)

van hevige activiteit (waarbij brokken lava tot 300 meter de lucht ingeslingerd werden) met periodes van rust. In juni 1986 verplaatste de activiteit zich van de zogenaamde Pu'u O'o vent op zo'n 20 kilometer van de *summit caldera* naar de Kupaianaha vent, zo'n 3 kilometer verderop. Daarmee veranderde ook het karakter van de eruptie van episodisch naar een min of meer continue uitbarsting, waarbij lava niet zozeer omhoog werd gesmeten, maar zich vooral ondergronds door zogenaamde lavatunnels verplaatste. Doordat lava in deze tunnels veel minder snel afkoelt dan wanneer hij in contact staat met lucht, kan hij zich veel beter en verder verplaatsen. Zo bereikte een lavastroom eind 1986 voor het eerst de oceaan en inmiddels is er ongeveer 50 km² met lava bedekt: een gebied dat 10 jaar geleden nog een tropisch bos was is nu een vlakke, bedekt met zwarte lava.

Daarnaast is een deel van de 'lava-bedekking' niet zonder gevolgen gebleven, want in 1992 is er een compleet dorp (Kalapana) door lava verwoest, net als het bezoekerscentrum van het park. Het enige wat daarvan nog is overgebleven zijn wat metalen delen die her en der boven het zwarte lavaveld uitsteken. In de zomer van 1992 verplaatste de activiteit zich opnieuw naar Pu'u O'o, maar het continue karakter van de uitbarsting bleef, terwijl het grootste deel van de lava zich ondergronds in lavatunnels in de richting van de oceaan verplaatste. Dit gaat zo door tot op de dag van vandaag. Slechts af en toe wordt de eruptie voor korte tijd onderbroken, waarna verse lava weer de bestaande tunnels vult of nieuwe tunnels gevormd worden.

Omdat het grootste deel van de lava zich dus ondergronds verplaatst, zijn er eigenlijk maar drie plekken waar daadwerkelijk lava te zien is. De eerste mogelijkheid waar lava te zien is, is op plekken waar de lavatunnel ingestort is, en waar zich zogenaamde *sky-lights* vormen. Op dergelijke plekken is het mogelijk om vanaf het oppervlak de tunnel in te kijken, waarbij de lava op een meter of 3 à 4 onder je en als een kabbelend beekje langs je heen stroomt. Overigens met een behoorlijke snelheid van rond de 15 kilometer per uur.

Een tweede plek om met lava in aanraking te komen is waar lava bovengronds stroomt, omdat de tunnel de toegevoerde hoeveelheid niet helemaal kan verwerken. Zoiets gebeurt vooral op de vlakke stukken en er ontstaan zogenaamde *surface flows*.

In contact met de lava

Omdat de lava zich buiten de tunnel over het algemeen maar heel langzaam verplaatst (hooguit 30 centimeter per minuut op de vlakke stukken), zijn deze plekken ideaal om je te verbazen over de bewegingen van vloeibaar gesteente, over de *live*-vorming en afkoeling van pahoëhoë (touwlava) en vooral ook om te genieten van de onvoorstelbare hitte en wat met lava te spelen. Zo is het bijvoorbeeld leuk om met een hamer een stukje lava op te pakken en er snel een kwartje in te drukken als souvenir voor later. Hierbij is het wel zaak om dit zo snel mogelijk te doen, omdat je monster binnen een paar seconden al is gestold, maar vooral vanwege de werkelijk allesoverheersende hitte in de directe nabijheid van lava (deze heeft een temperatuur van zo'n 1140 °C). Doordat de lava in contact met de buitenlucht relatief snel afkoelt, kunnen er zich (bijna) geen kristallen vormen en ontstaat er een laagje glas aan de buitenkant van een afkoelende *lava flow*. Deze glaslaag is verschrikkelijk scherp en daarom funest voor je schoenen, met name voor de zolen, die al na een dagje lopen voor het leven getekend zijn. Daarom blijft er alleen als je schoenzolen nog niet weggesmolten zijn en er nog wat profiel is overgebleven, de derde en laatste mogelijkheid over om lava van dichtbij mee te maken. Dit is op het punt waar de lavatunnel de oceaan in stroomt en lava in aanraking komt met zeewater. Afb. 4! Dit geeft meteen ook een uitermate spectaculair resultaat, omdat het contact tussen water en gloeiend gesteente een explosieve reactie geeft, waarbij een enorme rookpluim ontstaat, die bovendien met een pH van ongeveer 1,5 ook nog eens vrij zuur is. Daarnaast kunnen ook lavafragmenten de lucht ingeslingerd worden tot een hoogte van meer dan 100 meter of als een soort ballonnen uit elkaar klapen. Ik moet zeggen dat het vrij spannend is om op zo'n 30 meter afstand hiervandaan te staan, waarbij de grond trilt onder je voeten en er een geluid vrijkomt alsof er tien straaljagers opstijgen. Snel foto's nemen totdat alle rolletjes vol zijn en verder genieten van zoveel natuurgeweld is zo ongeveer alles wat je dan kunt doen.....