



Torres del Paine, Zuid-Chili. Onder de puntige toppen zijn lichtgekleurde granieten te zien. Die drongen ca. 12,5 miljoen jaar geleden in het donkergekleurde sediment van de bergen in, die daardoor werden gemetamorfoseerd. Een typisch voorbeeld van subductiemagmatisme in de "vulkano-plutonische Andes". Water speelt daarbij een belangrijke rol. (Foto Bram de Haan, 2005.)

Water in de endogene processen

FRANK F. BEUNK
VRIJE UNIVERSITEIT, AMSTERDAM
FACULTEIT DER AARD-EN
LEVENSWETENSCHAPPEN
AFDELING PETROLOGIE
FRANK.BEUNK@VU.NL

In 1983 publiceerden de bekende Australische geologen Campbell en Taylor een artikel onder de titel "No Water, No Granites – No Oceans, No Continents". De beste titel in jaren. Korter en fraaier konden ze het niet samenvatten. Water is niet alleen essentieel voor het leven, maar ook voor de "opmaak" van de dode, vaste aarde. De Aarde is de enige planeet in het zonnestelsel met een overvloed aan oppervlaktewater: en dat al minstens vier miljard jaar lang. Al die tijd heeft onze planeet zich in de "bewoonbare zone" van het zonnestelsel bevonden: niet te heet, niet te koud, precies goed voor vloeibaar water.

Het zoeken naar exoplaneten is in volle gang en het is een kwestie van tijd voordat de eerste "Aarde" bij een andere ster wordt gevonden. Met alleen al minstens tweehonderd miljard sterren in het Melkwegstelsel en een veelvoud aan planeten, is het uitgesloten dat we

"alleen op de wereld" zijn. Onze blauw-wit-groene planeet verradt zijn waterrijkdom behalve door zijn kleuren, ook door zijn karakteristieke, *bimodale* verdeling van het oppervlak: er is verhoudingsgewijs heel veel laagland op de continenten en heel



veel diepzee, de 4.000-5.000 m diepe bodem van grote delen van de oceanen (Afb. 1). De extremen zijn schaars zoals het hoort; er is heel weinig “Mount Everest” en ook heel weinig “Marianatrog”. Vergelijk dat met onze zusterplaneet Venus, bijna even groot en van dezelfde samenstelling, maar zonder die karakteristieke *bimodale* verdeling van het oppervlak. De conclusie van dit artikel luidt dat water ook dát verschil maakt. Venus had ooit water maar is het snel kwijtgeraakt: te dicht bij de zon, te heet.

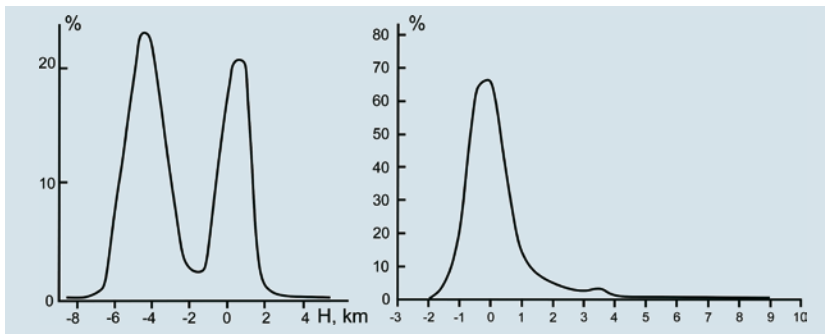
Granieten, continenten, oceaانبodems, het zijn producten van de endogene (= inwendige) processen van de aarde. Laten we nagaan wat water in de vaste aarde doet. Het is allereerst goed om te weten waar dat water zit en hoe het er zit. Omdat silicium en zuurstof de meest voorkomende elementen van de aarde zijn, bestaat hij voor een groot deel uit mineralen van de silicaatgroep. Binnen de silicaten zijn er twee hoofdgroepen die water als structurelement in hun kristalrooster inbouwen, de *bladsplijtergroep* (ofwel *phyllosilicaten*, bv. kleimineralen, serpentijn, muscoviet, biotiet, chloriet) en de amfibolen, die deel uitmaken van de *vezelsplijtergroep* (inosilicaten)¹. Een amfiboolformule ziet er bijvoorbeeld zo uit:

$\text{Ca}_2(\text{Mg,Fe})_5\text{Si}_8\text{O}_{22}(\text{OH})_2$, (actinoliet) en die van een *phyllosilicaat* zo:
 $(\text{Mg,Al,Fe})_{12}(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}(\text{OH})_{16}$ (chloriet).

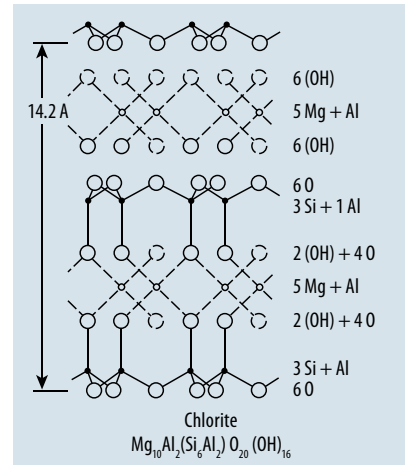
Het water zit er niet als neutraal, moleculair H_2O in maar als hydroxylgroep, $(\text{OH})^-$ (Afb. 2). Dit is hier een onmisbare en doorgaans onvervangbare bouwsteen, waarvan de hoeveelheid door de elementverhoudingen precies wordt vastgelegd; water is een structurele bouwsteen van het kristalrooster, op die plaatsen in het rooster is water nodig, anders kan het mineraal niet bestaan. De gedaanteverandering van het watermolecuul hoeft niemand te verbazen; ook in gewoon water is een klein deel van de moleculen gesplitst in positief geladen waterstofkernen (H^+) en negatief geladen $(\text{OH})^-$ -groepen. De hoeveelheden water die op zo'n manier in vaste kristalroosters zitten zijn niet mis, van 2 tot 4 gewichtsprocent bij de amfibolen en muscoviet, tot wel 14 gewichtsprocent bij de groene bladsplijter chloriet en in de serpentijngroep.

Daarnaast zijn er in andere hoofdgroepen van het silicatenrijk talloze “loslopende” silicaten met hydroxylgroepen, bijvoorbeeld humiet en vesuviaan (*nesosilicaten*), epidoot en lawsoniet (*cyclosilicaten*), cancriniet (*tectosilicaat*). Er zijn overigens ook talloze waterhoudende fosfaten (apatiet: $\text{Ca}_4(\text{PO}_4)_3(\text{OH,F,Cl})$), carbonaten (de Cu-carbonaten malachiet, azuriet, e.a.) en zeldzamere mineralen met water als hydroxylgroep.

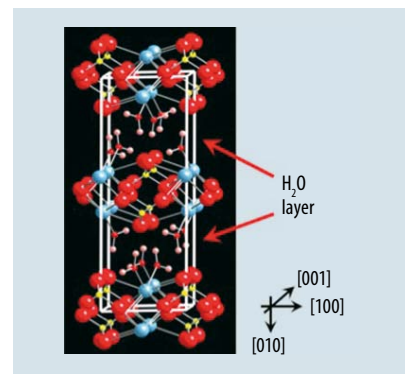
Er zijn nog drie andere manieren waarop water in mineralen voorkomt. Eén daarvan is “kristalwater”, neutrale watermoleculen in holtes van sommige mineralen met een ruim gebouwd ionenrooster. De moleculen maken geen deel uit van het ionogeen en covalent gebonden kristalrooster. In het mineraal gips, $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (Afb. 3), met twee watermoleculen voor elk molecuul calciumsulfaat, zijn de polaire watermoleculen door waterstofbruggen aan de sulfaationen gebonden. In de uitgeschreven mineraalformules zie je kristalwater dus terug als



AFBEELDING 1. | Hypsografische curves m.b.t. de hoogte/laagte-verdeling op de planeten Aarde (links; x-as: hoogte in km; y-as: % van het oppervlak) en Venus (rechts; x-as en y-as met dezelfde parameters, maar aangepaste schaalverdeling).



AFBEELDING 2. | De structuur van chloriet in 2D-projectie. Hydroxylgroepen zijn als gestippelde bolletjes getekend.

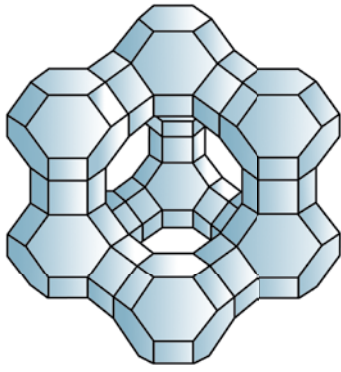


AFBEELDING 3. | Structuur van gips

moleculair H_2O en niet als $(\text{OH})^-$ -groep. Verschillende silicaten vertonen dit verschijnsel. Het hoogmetamorfe mineraal cordieriet is er zo een: $(\text{Mg,Fe})_2\text{Si}_5\text{Al}_4\text{O}_{18} \cdot n\text{H}_2\text{O}$, maar misschien het bekendste voorbeeld is de zeolietgroep (Afb. 4), een groep binnen de tectosilicaten (3D-polymeren van Si-O-ketens), met een kooistructuur. Zeolieten worden veel gebruikt als moleculaire zeven in de waterontharding en in de chemische industrie. Kristalwater is veel losser in het rooster gebonden dan hydroxylgroepen. Je kunt het er makkelijker uitkrijgen. Differentiële Thermische Analyse (DTA) en Thermogravimetrische Analyse (TGA) zijn twee klassieke

¹ De namen “bladsplijter” en “vezelsplijter” verwijzen naar de manier waarop hun kristallen splijten, nl. als tweedimensionale blaadjes, of als éénimensionale vezels. Splijting is het macroscopisch resultaat van atomaire bindingen op nanoschaal. Silicium en zuurstof vormen polymeren in een 2D-vlak, of in een 1D-snoer.





AFBEELDING 4. | *Structuur van een zeoliet. Si-O-ketens met alkali-kationen vormen een kooiconstructie met grote holten waarin watermoleculen passen.*



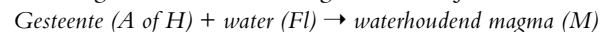
AFBEELDING 5. | *Vloeistofinsluitels in kwarts van een granietpegmatiet onder de microscoop. De meeste insluitels bestaan hier uit vloeibaar water met een bel van waterdamp. De schaalbalk is 0,02 mm lang.*

chemische methoden om de aanwezigheid van en het gehalte aan kristalwater en ionogeen gebonden (OH) te bepalen door mineralen langzaam te verhitten en hun gewichtsverandering door waterverlies bij te houden. Kristalwater is zwakker in het rooster gebonden en ontwijkt daarom bij lagere temperaturen dan de hydroxylgroepen. Verwijderen van de (OH)-groepen betekent afbraak van het kristalrooster.

Ten derde komt water ook nog voor als druppeltjes vloeistof en/of damp die in minuscule, maar microscopisch zichtbare holtes in mineralen ontstaan tijdens hun groei in gesteenten (Afb. 5). Zulke *fluid inclusions*, vloeistofinsluitels van doorgaans 1 tot 100 micrometer diameter, tonen aan dat mineralen vaak groeien in aanwezigheid van moleculair water waarvan het groeiende kristal een klein deel omsluit en vastlegt. Vloeistofinsluitels hebben niets van doen met de aard en structuur van het omringend kristalrooster.

Laten we, dit wetende, eerst kijken naar Campbell en Taylor's granieten en continenten. Een graniet is een stollingsgesteente, gekristalliseerd uit magma. De temperatuur waarbij granietmagma's in de continentkorst volledig vast worden varieert tussen 650°C en ruim 900°C. De variatie is een gevolg van de diepte waarop het magma stolt, maar vooral van zijn watergehalte. Hoe meer water er in het silicaatmagma zit opgelost, des te lager het vriespunt (= stolpunt = overgang van vast naar vloeibaar e.o.). Dat fenomeen is vergelijkbaar met de stol/vriespuntverlaging die we bereiken door water aan zout toe te voegen. Zout is beneden ca. 1.000 °C een vaste stof, maar door een klein beetje water toe te voegen, daalt het stol/vriespunt van zout spectaculair tot onder het vriespunt van water. Daarvan maken we o.a. gebruik bij het strooien van pekkel op winterse wegen. Bij het ontstaan van granieten is de vraag allereerst hoe er water in dat magma terecht komt. We volgen de weg terug: granietmagma's ontstaan doordat gesteenten van de continentkorst zo sterk verhit worden dat ze (gedeeltelijk) gaan smelten. Normaal gesproken, bijv. hier onder onze voeten, gebeurt dat niet. Bij een gemiddelde geothermische gradiënt (temperatuuroptoe name met de diepte) van 15 °C per kilometer is de onderkant van de continentkorst niet heter dan ruim 500 °C, te koud om te kunnen smelten. De continentkorst kan alleen zo heet worden als hij een stuk dikker is dan gemiddeld, bv. 70 km, zoals onder Tibet, of wanneer er van onderen af, uit de mantel extra warmte wordt toegevoerd. Dat vereist doorgaans bazaltmagma's, die met zo'n 1.200 °C in vulkanische gebieden uit de mantel omhoog komen. Zulke gebieden bestaan, dus hebben we daar een milieu waarin in principe granietmagma's kunnen ontstaan. Hoe kun je, in het eerstgenoemde geval, de continentkorst dubbeldik maken? Door continenten bij platentektoniek op elkaar te laten botsen. In de kreukelzone ontstaan ketengebergten met sterk verdikte korst. Ketengebergten zijn karakteristieke kraamkamers van granieten. Maar smelten zonder water vereist temperaturen van 1.000°C of daaromtrent en dat is zelfs voor de wortels van ketengebergten doorgaans te veel gevraagd. We hebben dan toch water nodig als smeltpuntsverlager. Dat water moet uit de oorspronkelijk vaste moeder-gesteenten komen, uit gesteenten met relatief veel waterhoudende mineralen. Vaak zijn dat schisten, de metamorfe equivalenten van kleiige en siltige sedimenten. Hoe komen zulke aan het aardoppervlak gevormde sedimentaire gesteenten dan op die grote diepte terecht? Door het mechanisme van gebergtevorming zelf, door de intense en ingewikkelde deformaties die optreden waar continenten tegen elkaar botsen. Een van die twee botsende continentranden is een "passieve continentrand", waar een continent overgaat in oceaankorst, zonder dat ze door een tektonische plaatgrens worden gescheiden. Voorbeelden van zulke *passive margins* zijn de Atlantische continentranden van Europa en Amerika en die van Afrika en Australië. Op zulke continentranden accumuleren met de tijd enorme hoeveelheden sediment dat door rivieren naar zee wordt getransporteerd, waaronder kleien die vol zitten met water. Die worden bij botsing tussen continenten als eerste geraakt en kunnen daarbij onder het andere continent geschoven worden. Smelten van zulke gesteenten levert granieten. De temperaturen waarbij, en de dieptes waarop continentale gesteenten beginnen te smelten en ook het effect van water daarop zien we in afbeelding 6:

Curve [1] in afbeelding 6 geeft het verloop weer van het smeltpunt van continentale gesteenten in aanwezigheid van vrij water:



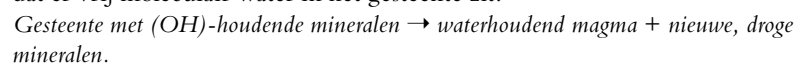
Hoe hoger de druk, hoe lager het smeltpunt bij deze reactie.

Curve [2] daarentegen laat de droge smeltcurve zien:



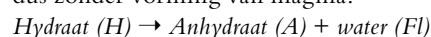
Let op de spectaculaire smeltpuntverlaging in curve [1] door het water in deze reactie.

Curve [3] is de smeltcurve van gesteenten met waterhoudende mineralen, zonder dat er vrij moleculair water in het gesteente zit:



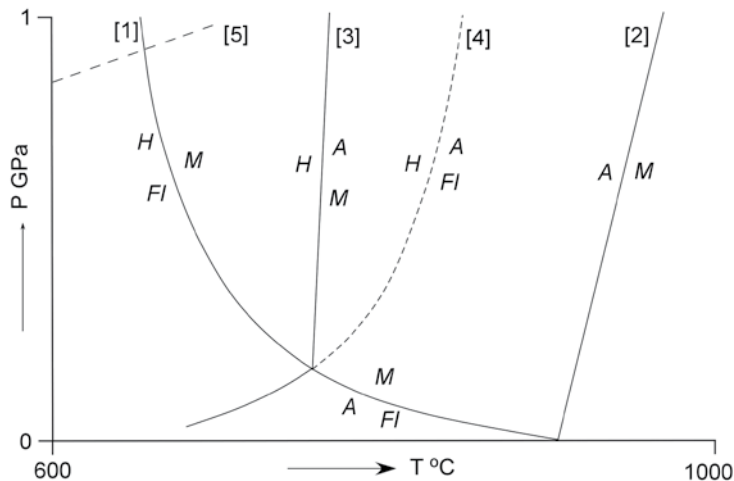
Dit proces heet "dehydratiesmelten".

Curve [4] is de metamorfe dehydratiereactie van (OH)-houdende mineralen, dus zonder vorming van magma:



De “geothermische gradiënt” van 20 °C/km is iets “warmer” dan de gemiddelde temperatuuroptoeame met de diepte in continenten. Hij illustreert dat het vrijwel ondoenlijk is om continenten onder normale omstandigheden te laten smelten.

Het is niet erg waarschijnlijk dat de spectaculaire smeltpuntverlaging door vrij water (curve [1] in Afb. 6) op grote schaal optreedt, want er is onder in de continentkorst helemaal geen vrij water. Daarom is de smeltcurve [1] niet erg relevant. Belangrijker is curve [3], die van dehydratiesmelten van hoogmetamorfe gesteenten. Bij de reactie dehydreren de waterhoudende mineralen (glimmers, amfibolen). Het water dat uit de kristalroosters vrijkomt lost direct op in het magma. Als zulk magma later weer kristalliseert kunnen er daarom (OH)-houdende mineralen uitkristalliseren: granieten bestaan uit kwarts, veldspaat en (OH)-houdende glimmers. Neem bv. de dehydratie-smeltreactie van de aluminiumglimmer muscoviet. De reactie produceert een granietmagma. Bij de temperatuur van deze



AFBEELDING 6. | Grafiek van temperatuur versus druk, equivalent aan diepte. Eén Gigapascal (GPa) komt overeen met de druk aan de basis van de continentkorst, op ca. 35 km diepte. Lijnen [1] t/m [4] zijn reacties van gesteenten waarbij magma's kunnen ontstaan. De symbolen naast de lijnen geven de reacties aan. H = hydraat [(OH)-houdend mineraal]; A = anhydraat (‘droog’ mineraal); FI = moleculair water; M = magma. Lijn [5] is de geothermische gradiënt van 20 °C/km.



AFBEELDING 7. | Karakteristieke migmatiet. Witte granietaders (in dit gesteente ontstaan en weer gestold) met zwarte, biotietrijke reactieranden. Hier en daar is rode granaat zichtbaar in deze melanosomen (= zwarte, granaathoudende banden). Tussen de granietaders met hun melanosomen zitten banden van grijsgekleurd, niet-opgesmolten, vast-gebleven metamorf gesteente. [NB: de doorsnede van het ‘Tamron’ lensdopje is ca. 5 cm]

reactie is de zwarte magnesium-ijzer-glimmer biotiet nog stabiel; biotiet is één van de producten, nieuw gevormd door de smeltreactie, samen met ‘droge’ mineralen als bijv. granaat. Zulke zwarte, granaathoudende banden (‘melanosomen’ = zwarte randen) kun je terugvinden in *migmatieten* (Afb. 7), menggesteenten die bestaan uit ter plaatse gevormd en opnieuw gestold ijzerarm en dus lichtgekleurd granietmagma plus de vaste, ijzerrijke en daarom donkergekleurde reactie-producten van de smeltreactie.

Zonder water geen granieten; zonder granieten geen continenten; en dus ook: zonder water geen continenten. Maar dat is niet alles. Zonder water ook geen platen en geen plaattektoniek! Dat zit zo. De midden-oceanische ruggen, de divergente plaatgrenzen van het plaattektonisch systeem, maken jaar na jaar, centimeter voor centimeter, nieuwe oceanische plaat aan. De korst daarvan bestaat uit bazaltlava en zijn diepere equivalenten. Met het ouder worden schuift de plaat weg van de rug, koelt af, wordt dikker en zakt in tot de diepzeevlaktes op 4.000-5.000 m waterdiepte (Afb. 1). Mid-oceanische ruggen liggen onder water en de ruggen staan ook nog eens onder rekspanning dwars op de rug, waardoor ze vol zitten met openstaande spleten. Het diepe bodenwater is 1,5 °C koud. De bazaltische magma's hebben een temperatuur van ca. 1.200°C en de magmakamer waar ze uit komen zit niet meer dan een paar kilometer diep. Onder die omstandigheden ontstaat er een virulent circulatiesysteem van oceananwater door de hete korst. Een heel oceaantvolume spoelt er op die manier in enkele tientallen miljoenen jaren door de mid-oceanische ruggen heen. Dat laat in de korst zijn sporen na, in de vorm van nieuw gevormde, waterhoudende metamorfe mineralen, vooral chloriet, epidoot en amfibool, groene mineralen die de bazalten veranderen in metamorfe ‘groenstenen’. Door de processen van rek komen er hier en daar zelfs stukken van de onderliggende aardmantel aan het oppervlak. De olivijnrijke peridotieten van de aardmantel worden daarbij omgezet in serpentiniten, door omzetting van olivijn [(Mg,Fe)₂SiO₄] in waterrijke serpentijn [Mg₃Si₂O₅(OH)₄]. Zelfs verder van de mid-oceanische ruggen af, waar de korst ouder en ouder wordt en meer en meer door sedimenten



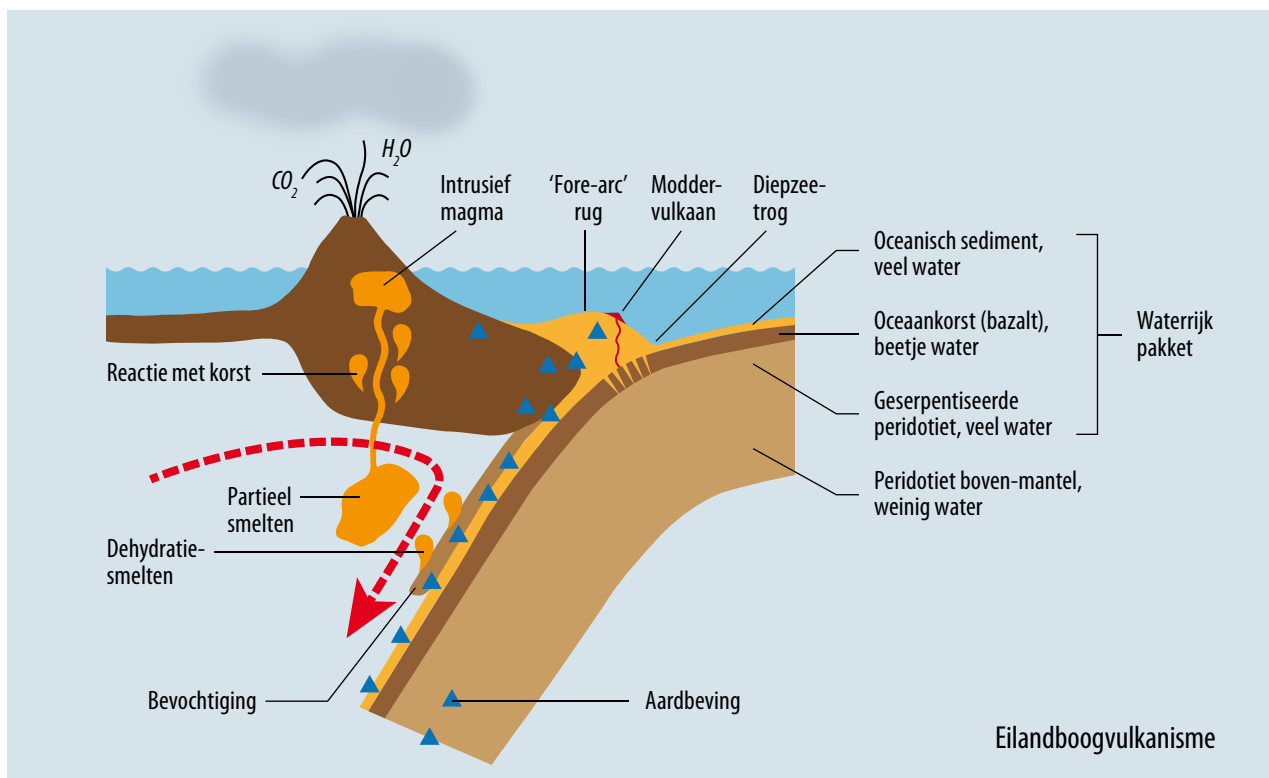
wordt afgedekt, kan er nog zeewater in de bazaltkorst doordringen en er waterhoudende mineralen vormen. Ongeveer de helft van de hydratatie van de korst vindt buiten de ruggen plaats.

Het onvermijdelijke lot van oceaan-korst in het platentektonische systeem van de aarde is subductie. Waar een subducerende plaat naar beneden buigt, de subductiezone in, ontstaan opnieuw openstaande scheuren in het bovenoppervlak, waar water in dringt en tot in de mantel onder de 7 km dikke korst opnieuw voor hydratatiereacties zorgt. Al met al bestaat een subducerende oceanische plaat voor ca. 2 gewichtsprocent uit water. Als dat niet grotendeels via vulkanen weer naar buiten zou komen, zou de hele oceaan in een paar honderd miljoen jaar gesubduceerd zijn.

Veruit het meeste water komt terug boven subductiezones. De prachtige kegelvulkanen die onderduikende platen markeren (Chili, Japan, Indo-

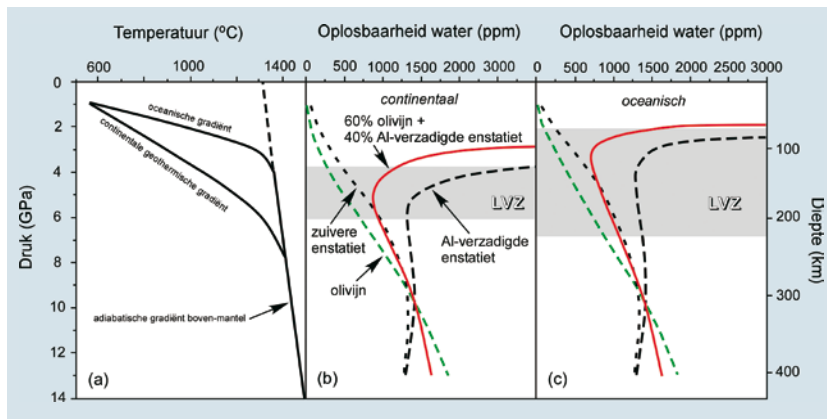
nesië, Antillen, enz.), danken hun ontstaan aan de smeltreacties van afbeelding 6. Afbeelding 8 geeft een beeld van de ingewikkelde processen in een subductiezone. Onder de “fore-arc”-rug, de vaak dikke en soms boven water uitstekende bult van afgeschraapte sedimenten, begint er al water uit de diepzeekleien vrij te komen. Dat smeert de ondiepe delen van de subductiezone en leidt tot het ontstaan van moddervulkanen aan het oppervlak. Vanaf ca. 30 km diepte beginnen de metamorfe groenstenen en serpentiniëten van de subducerende korst en mantel te dehydreren door metamorfe reacties van het type [4] in afbeelding 6. Het water ontwijkt uit de plaat en sijpelt naar boven, de “mantelwig” in, die boven de subductiezone ligt. Op die diepte is het nog te koud voor smeltreacties; het vrijgekomen water wordt ingebouwd in nieuwe metamorfe mineralen die uit de nat geworden mantel ontstaan. Dat zijn voornamelijk amfibolen en de reactie is dezelfde curve [4] in afbeelding 6, maar nu in peridotieten van de mantel en in omgekeerde richting: $A + Fl \rightarrow H$. Deze amfibolen groeien dus vlak boven de onderduikende plaat en ze worden met de plaat mee naar beneden gesleurd, waar het steeds warmer wordt. Op een diepte van 100 km treedt dan de dehydratiesmeltreactie [3] van afbeelding 6 op en ontstaat magma, in dit geval bazaltmagma, waarin een paar procent water zit opgelost. Op zijn weg omhoog reageert dit met het vaste nevengesteente en kristalliseert al gedeeltelijk uit, waardoor veel van de magma's die uit kegelvulkanen erupteren uiteindelijk *andesieten* zijn, Si-rijker en (Mg, Fe)-armer dan bazalten. Het opgeloste water maakt de vulkanen explosief. Andesieten blijken de samenstelling van de *gemiddelde* continentkorst te hebben. Zo maakt de Aarde dus continenten, via het subductieproces en water: *zonder water geen continenten!*

Hoewel de endogene watercyclus door subductievulkanisme grotendeels wordt gesloten, ontsnapt niet al het water uit de onderduikende plaat. In de diepe plaat



AFBEELDING 8. | Schets van een oceanische subductiezone onder een vulkanische eilandboog. De gestreepte, rode lijn met pijl boven de subducerende oceanische plaat (in de “mantelwig”) geeft aan hoe het gesteente daar stroomt, als gevolg van de subductie. De subducerende plaat is veranderd in een waterrijk pakket. Diepe scheuren bij het omhoogpunt reiken tot in de mantel en zorgen daar voor extra hydratatie. Water ontsnapt al in moddervulkanen van onder de “fore-arc”-rug (de ‘hobbel’ van afgeschraapte sedimenten vóór de vulkanenrij, d.w.z. tussen de vulkanen en de diepzeetrog). Wat dieper bevochtigt ontwijkt water de mantel boven de plaat en groeien metamorfe amfibolen. Pas op ca. 100 km diepte wordt de bevochtigde zone heet genoeg om te smelten (dehydratiesmelten). Van daaruit opstijgend, waterhoudend bazaltmagma reageert onderweg met de mantel en de korst en kristalliseert gedeeltelijk al uit. Er resteert andesitisch magma, karakteristiek voor subductievulkanen. Ontsnappend gas bevat ook CO_2 , vrijgekomen uit gesubduceerd kalksediment. De waterrijkdom van het magma komt o.a. tot uiting in de groei van karakteristieke waterhoudende mineralen (amfibool, biotiet).

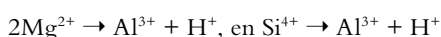




AFBEELDING 9. | (a): Geothermische gradiënt in de bovenste 400 km van de aarde. De lithosfeerplaat (~100 km dik onder oude oceaانبodem, ~200 km dik onder continenten) heeft een geleidingsgradiënt (bij benadering een rechte lijn tussen de hete onderkant en de koude bovenzijde). De gradiënt in de asthenosfeer is daarentegen adiabatisch (d.w.z. T verandert alleen door druk). Waar de ene in de andere gradiënt overgaat, ligt de basis van de plaat. (b): Oplosbaarheid van water in nominaal water-vrije mineralen van de subcontinentale boven-mantel; 1000 ppm = 0,1 gewichts-procent. (c) Idem in de suboceanische mantel. Een typisch gesteente van de boven-mantel, een harzburgiet met 60% olivijn en 40% aluminium-verzadigde orthopyroxen (enstatiet) vertoont een minimum in de oplosbaarheid van water, aangegeven door de rode curves. De minima vallen binnen de seismische lage snelheidszones (LVZ), aangegeven met grijze banden. (Bron: Mierdel et al., 2007, *Science* 315: pp. 364-368)

ontstaan er “dense hydrous magnesium silicates” (DHMS) die het subductieproces overleven. Aardbevingshaarden op een diepte van ca. 300 km in subductiezones vormen twee evenwijdige zones, één ervan op het contact tussen de plaat en de mantel erboven, maar ook één midden in de plaat zelf (Afb. 8). De “binnenste” zone wordt wel beschouwd als een gevolg van abrupte metamorfe dehydratie-reacties. Al met al verdwijnt er dus toch wat water de mantel in en een ruwe schatting wil dat er zich permanent ongeveer een heel oceaanvolume aan water in de bovenste 700 km van de mantel bevindt. Of dat ook voor de diepere mantel geldt, is nog onduidelijk, maar wel waarschijnlijk, omdat subducerende oceanische platen helemaal naar de bodem van de mantel vallen. Terwijl het meeste gesubduceerde water via de subductievulkanen weer in de atmosfeer terugkeert (Afb. 8), lekt het water dat de subductie overleeft weer langzaam terug via het vulkanisme van de mid-oceanische ruggen: De bazaltmagma’s van de ruggen zijn bijna droog, maar niet helemaal; er zit ongeveer eentiende gewichtsprocent water in.

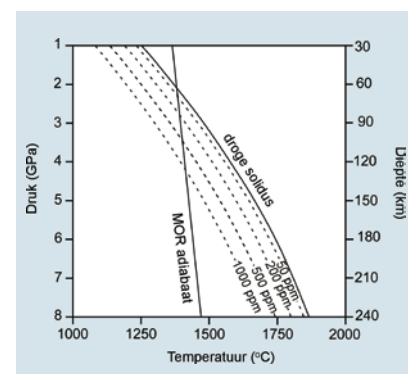
In de jaren '80 liet een Duitse geochemicus op een congres zien hoe er tot zijn eigen verbazing water uit het ‘droge’ mantelmineraal olivijn (Mg_2SiO_4) kwam. Intussen is duidelijk geworden wat er gebeurt: een vierde manier om water in gesteenten op te lossen, in dit geval in “nominaal watervrije mineralen” zoals olivijn. Onder de hoge temperaturen en drukken van de mantel doen alle drie belangrijke mineralen van de bovenste 400 km van de mantel hier aan mee: naast olivijn de orthopyroxen enstatiet (MgSiO_3) en de clinopyroxen diopsied ($\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$). Dit is wat er gebeurt:



Deze reacties vervangen een klein deel van het magnesium en het silicium door aluminium plus een kale waterstofkern. Dit zijn silicaten, dus oxidische mineralen. Met waterstof erbij heb je chemisch gezien ‘water’. De oplosbaarheid van water is op deze manier niet erg groot, maximaal een paar duizend *parts per million* (ppm) – zie afbeelding 9. Men denkt dat dit proces een belangrijke bijdrage vormt aan de injectie van water in de diepere mantel en ook aan de vermindering van de stroperigheid van mantelgesteente en daarmee aan de langzame maar gestage convectie van de aardmantel.

Ook een geringe hoeveelheid water leidt al tot smeltpunt-daling van de mantel. Dat effect zien we in afbeelding 10.

Eéntiende gewichtsprocent water (1.000 ppm) geeft al een smeltpunts-verlaging van enkele honderden graden. Anders gezegd, terwijl een droge mantel onder mid-oceanische ruggen pas op een diepte van ca. 60 km begint te smelten, doet een mantel met 0,1 gewichtsprocent water dat al op 120 km diepte. Afbeelding 9 maakt aannemelijk dat op die dieptes water als moleculair, vrij water uit de mantelmineralen is ontmengd. Een klein percentage opsmelting leidt al tot drastische sterktevermindering van het gesteente. Het optreden van een minimum in de voortplantingssnelheid van geluidstrillingen in de Low Velocity Zone (LVZ) op die diepte is daarmee in overeenstemming. Bovendien is die laag in de boven-mantel ook nog eens abnormaal sterk elektrisch geleidend; ook dat duidt op aanwezigheid van een klein percentage silicaatvloei-stof, dan wel op de aanwezigheid van vrij water. De relatief zwakke LVZ aan de basis van de lithosfeerplaat vormt de glijlaag waar lithosfeerplaten overheen schuiven: *zonder water geen asthenosfeer, zonder asthenosfeer geen platentektoniek*. Daarom heeft Venus geen platentektoniek en geen continenten, maar de aarde wel (Afb. 1).



AFBEELDING 10. | Minimum smelttemperaturen van de mantel zonder enig water: “droge solidus”. Oplossing van water in nominaal droge mineralen (Afb. 9) verlaagt de temperaturen waarbij het smelten begint; de gestippelde solidi geven de smeltpunten voor verschillende hoeveelheden water in de mantelgesteenten. De adiabatische temperatuurgradiënt onder een Midden-Oceanische Rug (MOR) is aangegeven.

