

Caribisch Nederland: BONAIRE,

eiland met een bewogen geologische geschiedenis

door Jan van den Koppel
jhvdk@wxs.nl



Afb. 1. Overzicht Caribisch gebied. De Benedenwindse Antillen worden gevormd door de eilandengroep Aruba-La Blanquilla. Deze boog maakt deel uit van de Kleine Antillen en is vulkanisch niet actief. Saba en Sint Eustatius (Statia) behoren tot de Bovenwindse Antillen en maken deel uit van het vulkanisch actieve boogdeel van de Kleine Antillen. Puerto Rico, Hispaniola en Cuba vormen de boog van de Grote Antillen. Av: Aves eilanden, Ro: Los Roques, Or: La Orchilla, To: La Tortuga, Bl: La Blanquilla, Ma: Margarita, Tr: Trinidad.

Nederland is vanaf 10 oktober 2010 niet uitsluitend meer een Europees maar ook een Caribisch land. Sinds deze datum is Nederland drie bijzondere gemeenten rijker. Ze liggen in het Caribisch gebied en maakten eerder deel uit van de Nederlandse Antillen (de Nederlandse Antillen bestaan niet meer). Bonaire, Sint Eustatius en Saba heten nu Caribisch Nederland, maar ze worden naar hun beginletters ook wel de BES-eilanden genoemd. De overige eilanden: Aruba, Curaçao en Sint Maarten zijn nu autonome landen binnen het Koninkrijk der Nederlanden. In 2007 bezocht ik Saba en Sint Eustatius en in 2010 Bonaire. In dit artikel geef ik een beknopt overzicht van de geologie van Bonaire, over het ontstaan van het eiland als deel van het Caribisch gebied en over de eventuele geologische relatie met de buureilanden Aruba en Curaçao.

Geografisch overzicht

De eilanden in het Caribisch gebied worden onderverdeeld in de Grote en Kleine Antillen (afb. 1). Cuba, Hispaniola en Puerto Rico worden tot de Grote Antillen gerekend. De eilandengroep vanaf Puerto Rico tot en met Aruba noemt men de Kleine Antillen. De Kleine Antillen worden onderverdeeld in Bovenwindse en Benedenwindse Antillen. De Benedenwindse Eilanden, waaronder Aruba, Bonaire en Curaçao, de ABC-eilanden, liggen dicht bij elkaar voor de kust van Venezuela. Ze vormen met een aantal kleine Venezolaanse eilanden een eilandboog (Aruba-La Blanquilla keten) waarvan de oudste gesteenten vulkanisch zijn maar waar actieve vulkanen ontbreken. Sint Eustatius en Saba liggen 900 km van de Benedenwindse Eilanden verwijderd. Ze maken deel uit van een vulkanisch actieve eilandboog en er bevinden zich een paar sluimerende vulkanen. Bonaire (afb. 2) is met een oppervlakte van 288 km² kleiner dan

Curaçao maar iets groter dan Aruba. Ter vergelijking: de oppervlakte van Texel is 163 km². Kralendijk is de hoofdstad; Rincon, dat tussen de heuvels in een dal ligt, is het oudste plaatsje op Bonaire. Klein Bonaire, ongeveer 8 km² groot, heeft alleen wat lage begroeiing. Het wordt net als Bonaire voornamelijk bezocht door duiktoeristen. Het grootste deel van het heuvelachtige noordwesten wordt ingenomen door het Nationaal Park Washington Slagbaai, het eerste natuurreservaat op de toenmalige Nederlandse Antillen. De zee rondom Bonaire en Klein Bonaire, vanaf de hoogwaterlijn aan de kust tot 60 meter diepte, is eveneens natuurreservaat: het Bonaire National Marine Park. Iedereen die gebruik maakt van de zee betaalt een toegangsprijs, de zgn. 'Nature Fee'. De opbrengst komt ten goede aan het beheer van de parken. In het zuidoosten ligt Lac Bay, een grote lagune beschermd door een barrièrerif en omzoomd met mangroven die ook deel uitmaken van het Marine Park. Er zijn meer lagunes op Bonaire maar die zijn door natuurlijke dijken van koraalpuin afgesloten van de zee. Ze worden *saliña's* genoemd, zoutmeren. In het zuiden liggen de zoutpannen. Zout werd al snel na de ontdekking van het eiland, omstreeks 1500, gewonnen. Bonaire is een belangrijke zoutexporteur. De zoutpannen zijn echter het bekendst door de aanwezigheid van de grote flamingokolonie. Honderden flamingo's nestelen en broeden daar in een beschermde omgeving.

De geologie van Bonaire

De oudste gesteenten van Bonaire stammen uit het Midden-Krijt (Albien en Cenomanien). Ze hebben de magmatische signatuur



Afb. 2. Kaart van Bonaire



Afb. 3. Vereenvoudigde geologische kaart van Bonaire. Het grootste deel van het eiland bestaat uit Neogene en Kwartaire kalksteen. De oudste gesteenten worden gevormd door andesitische en (rhyo-)dacitische afzettingen uit het Krijt (tussen Albien en Coniacien). De vulkanische formatie (BWF, de Bonaire Washikemba Formatie) bestaat uit een Noord-Complex dat het heuvelland omvat en een Zuid-Complex, een gebied ten oosten van Kralendijk. Verder heel lokaal de Rincon Formatie, een uit kalksteen en conglomeren bestaande afzetting uit het Laat-Krijt (Maastrichtien) (Mac Gillavry e.a. 1977), en langs de weg van Kralendijk naar Rincon, bij Subi Blancu, ligt een fluviaatiele afzetting van conglomeren, zandsteen en kleisteen: de Subi Blanco Formatie. In deze afzetting uit het Eoceen zijn granodiorieten, aplieten, gneis, schisten, kwartsieten en amfibolieten in de vorm van rolstenen gevonden die geologisch 'vreemd' zijn voor Bonaire. Deze Subi Blanco Formatie met de rolstenen zou gevormd zijn in een periode dat Bonaire met het vasteland van Zuid-Amerika verbonden was. Bovenop de heuvelrug vanaf de Seru Largu naar Montagne ligt een kalksteenafzetting zonder de macrofossielen (koralen) die men in de terraskalken vindt. Deze versteende duinafzettingen (eolianieten) komen op alle drie de eilanden voor. Lijzijde: De NO-passaat waait hier vanaf het land richting zee. Aan deze kant van het eiland is de zee kalm en is er nauwelijks branding. Loefzijde: De wind waait hier vanuit de zee naar het land, de zee is hier wild met een flinke branding. (Kaart getekend naar Pijpers (1933), De Buissonjé (1974) en Beets e.a. 1977).

van een vulkanische eilandboog als het gevolg van subductie van een oceanische plaat onder een andere oceanische plaat. Gezien de huidige geografische ligging zou men op het eerste gezicht verwachten dat Bonaire samen met de zustereilanden Aruba en Curaçao ontstaan is. Maar waar Aruba en Curaçao door een gemeenschappelijke geologische oorsprong werkelijk zustereilanden zijn, is Bonaire een ouder stiefzusje. Het volgende scenario wordt door velen voor mogelijk gehouden, maar het laatste woord is er nog niet over gezegd:

De eilandenboog waar Bonaire is ontstaan, is de Grote Caribische Eilandboog (afgekort GCEB), ook bekend als de 'Great Arc'. Deze lag ongeveer ter hoogte van het huidige Midden-Amerika in een Proto-Caribische zee. Het was dezelfde boog waar ook grote delen van de Grote Antillen ontstaan zijn. Aruba en Curaçao zijn 8 tot 10 miljoen jaar later ter hoogte van de Galapagos Eilanden ontstaan als deel van een oceanisch plateau: een enorme onderzeese basaltische eruptie die het gevolg

was van een opstijgende mantelpluim. Meer over deze interessante hypothese over de plaatbewegingen van het Caribische gebied is te vinden onder het kopje 'Een mogelijk scenario voor het ontstaan van het Caribisch gebied' in dit artikel.

Tijdens het Laat-Krijt worden kalkstenen, conglomeraten en conglomerasche kalkstenen op het vulkanische gesteente van Bonaire afgezet (Rincon Formatie). Uit het Eoceen stamt de Subi Blanco Formatie, een fluviaatiele afzetting van conglomeraten en zandsteen, waarschijnlijk afkomstig van het vasteland van Zuid-Amerika. De drie eilanden werden tijdens het tektonische proces van de vorming van het Caribisch gebied ergens in het Tertiair afgezet voor de kust van Zuid-Amerika. Vanaf het Mioceen loopt de geologische geschiedenis van de eilanden gelijk op. Het is dan allemaal kalksteen wat de klok slaat. (Zie de geologische kaart van Bonaire, afb. 3.) Het geelgekleurde deel laat zien dat de vorm van het eiland voor het grootste deel bepaald wordt door Neogene en Tertiaire kalksteen, een enkele afzetting uit het Paleogeen daargelaten.

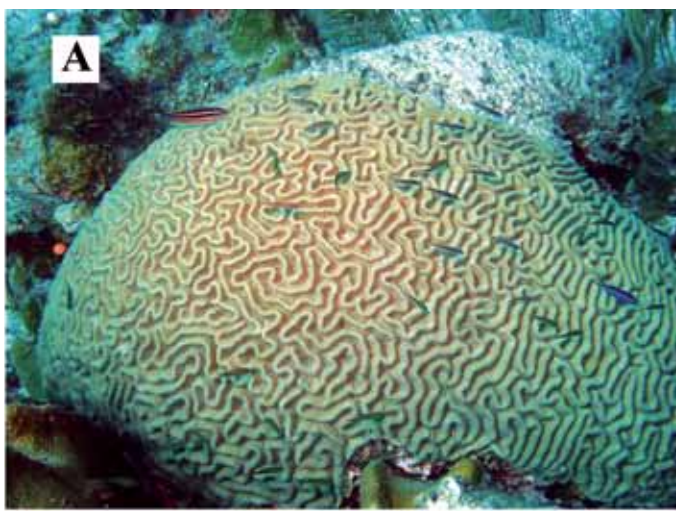
Ook op Aruba en Curaçao nemen de kalksteenformaties een groot deel van de eilanden in en in dit opzicht lijken de drie eilanden heel veel op elkaar. Kalksteen in allerlei vormen: koraalrif en kalkzandstranden, dat is waarvoor de meeste toeristen op de ABC-eilanden komen. Maar ook voor kalkterrassen en klifkusten, gevormd tijdens wisselende zeespiegelniveaus. Ik ben mijn tocht over Bonaire dan ook begonnen met het bekijken van de kalksteenformaties, boven en onder water.

Koralen: juwelen van kalksteen

Een paar keer per week kan men vanaf Amsterdam rechtstreeks naar Bonaire vliegen. Na een vlucht van negen uur landt men op Flamingo Airport bij Kralendijk. Tijdens de landing zien we de diep blauwe kleur van de zee langzaam veranderen. De koraalformaties langs de kust vormen een patroon van donkergroene vlekken temidden van lichtgroen, waar de bodem voornamelijk uit wit koraalzand bestaat. Bonaire heeft een onderwaterwereld die tot de mooiste ter wereld behoort. Het eiland heeft zich dan ook gericht op duiktoerisme. Bonaire is een 'Divers Paradise' - voor wie dat nog niet duidelijk was, het staat op alle nummerplaten van de auto's. Men vindt meer dan zestig duiklocaties vlak langs de kust. Het koraalrif begint op het moment dat men de zee ingaat. Bonaire staat in de duikwereld dan ook bekend als de 'shore diving capital of the world'. Maar om koralen te bewonderen hoeft men niet per se het water in, want fossiele koralen vindt men ook op het land (afb. 4). Ze liggen soms hoog op de kalkstenen plateaus als bewijs dat daar ooit de zee gestroomd heeft. Datering van fossiele koralen heeft een belangrijke rol gespeeld bij het vaststellen van de fluctuaties van de zeespiegel. Verder heeft men aan de hand van de soort en de oriëntatie van deze fossiele koralen een reconstructie kunnen maken van de Kwartaire geschiedenis van de eilanden.

Seru Domi Formatie: koraalpuin uit het Neogeen

De oudste kalksteenformatie op Bonaire stamt uit het Eoceen. De fossielinhoud van deze Vroeg-Tertiaire kalken laat zien dat Bonaire toen onder water lag. In de periode daarna is het eiland weer boven water gekomen, tot aan het Laat-Mioceen. De zeespiegel stond toen weer zo hoog dat alleen de hoogste toppen van de eilanden boven water uitstaken. Rondom deze toppen groeiden koraalriffen. Regionale opheffing vond al plaats vanaf het Midden-Mioceen. Door erosie braken de koraalriffen langzaam af, het koraalpuin verzamelde zich op de helling van het onder water liggende 'voor-rif'. Deze koraalpuinhellingen liggen nu boven water en vormen de Seru Domi Formatie. De heuvels (seru = heuvel) hebben een zeewaarts gerichte gelaagdheid met een helling tot ongeveer 32°, de bovenkant is meestal bedekt door een Kwartaire kalkterras of door versteende kalkzandduinen (eolianieten). Deze typische schuine heuvels komen op alle drie de eilanden voor, vrijwel uitsluitend aan de lijzijde. Op Curaçao zijn deze formaties het opvallendst. De naam van de formatie is



Afb. 4. Levende en fossiele koralen. A. Levend hersenkoraal op een diepte van ongeveer 4 m op Bonaire. B. Dit fossiele hersenkoraal ligt permanent boven water. C. Het vertakte koraal rechts is levend elandsgeweikoraal (*Acropora palmata*). Het is een van de bekendste koraalsoorten die bestand is tegen hevige branding en daarom vaak in barrièrezones voorkomt. D. Fossiel *Acropora palmata* op het laagterras, vlak langs de kust in de sproeizone.

afkomstig van één van deze heuvels: de Seru Domi. Afb. 5A laat een mooi voorbeeld van zo'n koraalpuinhelling zien. De formatie ligt langs de nauwe ingang naar het Goto-meer in het noordwesten van Bonaire.

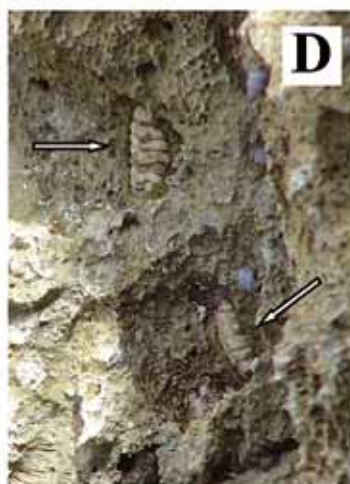
Kalksteenterrassen en klifkust

Bonaire is net als Aruba en Curaçao volledig omgeven door kalksteenterrassen uit het Kwartair. De terrassen zijn de stille

getuigen van een opeenvolgende serie zeespiegelstijgingen en -dalingen, een gevolg van interglaciale en glaciële perioden. De tektonische opheffing ging en gaat gewoon door zodat terrasvorming nog steeds plaatsvindt. De Neogene en Kwartaire kalksteenterrassen zijn door De Buissonjé in zijn dissertatie uit 1974 uitgebreid besproken. De Buissonjé onderscheidde vijf verschillende terrassen. Latere onderzoeken komen tot een fijnere verdeling van de terrassen. Het jongste terras is het Laag-Terras; het ligt rondom het eiland en grenst aan de zee. Het oudste



Afb. 5. Seru Domi Formatie. Foto A is genomen vanaf de oostelijke oever van de ingang naar het Goto-meer. De formatie staat aangegeven op de geologische kaart (afb. 3). De lagen bestaan uit kalksteen die voor een groot deel omgezet is in dolomiet. De bijna horizontale bovenkant is het erosievlak van het Midden-Terras. Rechts in het beeld grenzen de lagen aan de vulkanische Washikemba Formatie. B. Op Curaçao zijn deze Neogene koraalpuinhellingen het opvallendst. De foto is genomen met het zicht op drie van deze heuvels, die zich om en nabij Willemstad bevinden. Eén van deze heuvels heet Seru Domi en heeft de naam gegeven aan deze formatie.

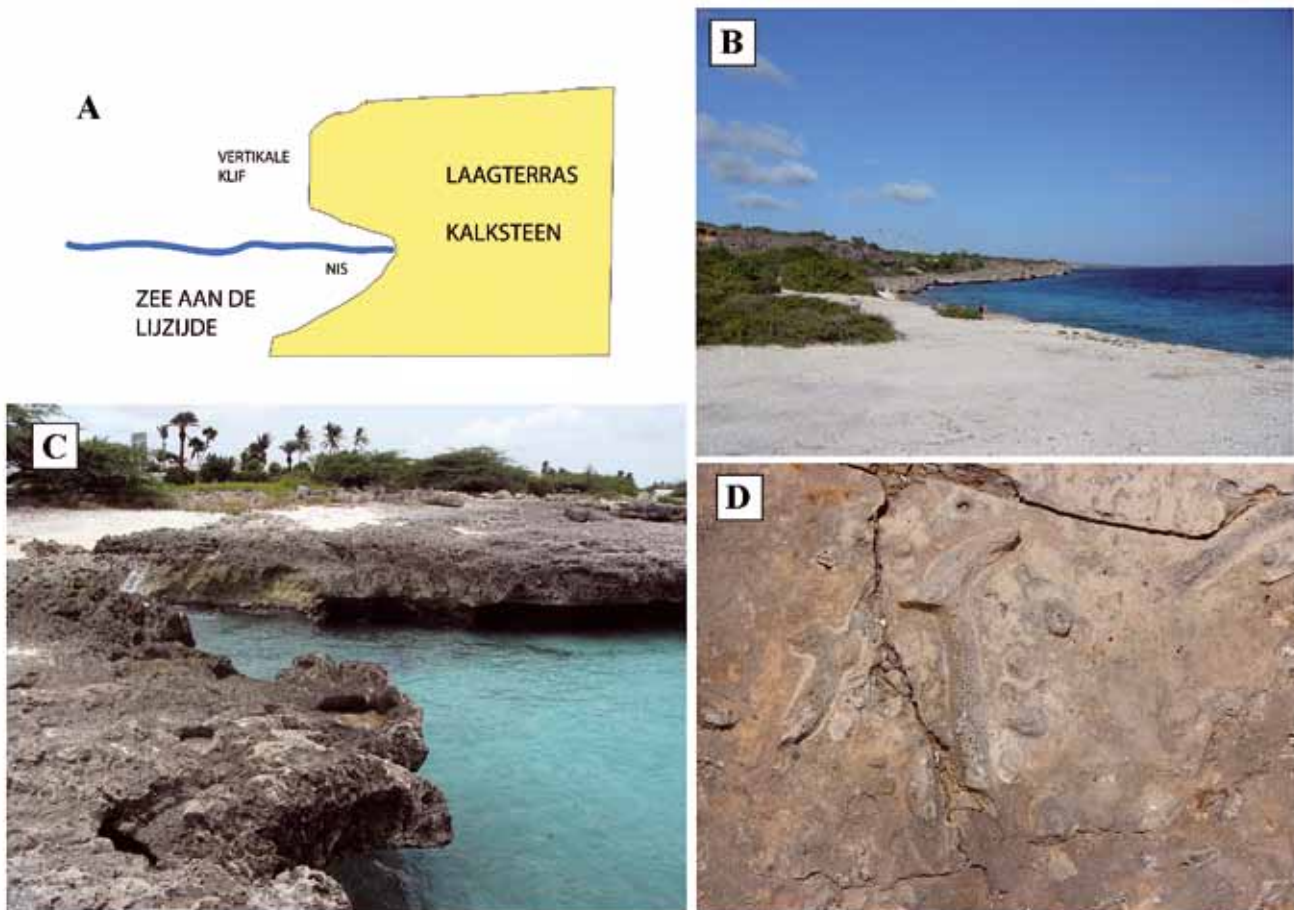


Afb. 6. Klifkust aan de loefzijde.

A. Profiel van de klifkust aan de loefzijde. (Beschrijving in de tekst.) B. De verticale wand met daarin een fossiele koraalformatie. De wand bevindt zich in een kleine inham (=boca). Verder is de oplossingsnis (solution notch) te zien met een beginnende uitstekende bank en roze kalkafscheidende algen. De hoogte van de nis hangt af van de golfhoogte. C. Een hogere nis dan in B in dezelfde inham. De nis is groter vanwege de hogere golven in de nabijheid van de kustlijn. D. De oplossingsnis (boven de uitstekende bank) wordt niet door mechanische erosie van de brandingsgolven veroorzaakt door het ontbreken van zand of rolstenen. De nis ontstaat door een combinatie van kalkoplossende organismen en door 'grazers' (in dit geval keverslakken). E. De sproeizone is het gebied dat dicht bij de kustlijn ligt en dat door de brekende golven besproeid wordt. Hierdoor lost de kalk van het terras op en ontstaan er karren. F. De (koraal)puinwal, die soms op enkele tientallen meters van de kustlijn ligt. De brokstukken zijn waarschijnlijk tijdens hevige stormen op de kust geworpen.

terras is het Hoogste-Terras, dat op wel op Curaçao, op een enkele plek ook op Bonaire, maar niet op Aruba voorkomt. Waar het Laag-Terras aan de zee grenst, vindt men vaak een klifkust. Afb. 6A toont het profiel van een klifkust aan de loefzijde (afb. 3) van het eiland. We onderscheiden vanaf de kant achtereenvolgens een (koraal)puinwal die soms meer dan 10 meter van de werkelijke kustlijn af ligt en die tijdens hevige stormen daar

neergelegd is (afb. 6F); een karrenzone op de plek waar de zee permanent sproeit en waardoor de kalksteen langzaam oplost (afb. 6E); een verticale wand en meteen daaronder een nis. Deze nis (afb. 6B,C) wordt veroorzaakt door bio-erosie en niet door de constant beukende golven. De kalksteen in de nis wordt door algen en bacteriën chemisch opgelost. Dit uithollingsproces gaat redelijk snel (1-2 mm/jaar). De hoogte van deze oplossingsnis



Afb. 7. Klifkust aan de lijzijde.

A. Er is een oplossingsnis net zoals aan de loefzijde, maar de uitstekende bank met de aangroeizone ontbreekt. De organismen die hiervoor moeten zorgen kunnen alleen in turbulent water overleven. De nis onder de waterspiegel vormt hier één geheel met de oplossingsnis. De karrenzone is niet tot nauwelijks aanwezig en er is geen sprake van een puinwal. B. Het Laag-Terras bij Karpata op Bonaire. Aan de lijzijde is het Laag-Terras veel smaller dan aan de loefzijde. De masten op de foto zijn van Radio Nederland Wereldomroep. C. Kleine boca in het Laag-Terras aan de lijzijde van Aruba. De diepe nis op de voorgrond heeft scheuren in het terras veroorzaakt.

*D. Fossiel koraal: Hertshoornkoraal (*Acropora cervicornis*), een veel voorkomend koraal aan de lijzijde van de eilanden. Men vindt kleine brokstukken van dit koraal vaak los, afgerond, op de stranden aan de lijzijde.*

(solution notch) hangt af van de hoogte van de golven. Aan de lijzijde, waar de zee veel rustiger is, is de hoogte van de nis kleiner dan aan de loefzijde. Het afbraakproces wordt geholpen door 'grazers' zoals keverslakken (afb. 6D) die met hun uit magnetiet bestaande 'tandjes' de algen in de nis afschrapen (bio-mechanische erosie). Hierdoor wordt 'verse' kalksteen blootgelegd die opnieuw door de algen opgelost wordt.

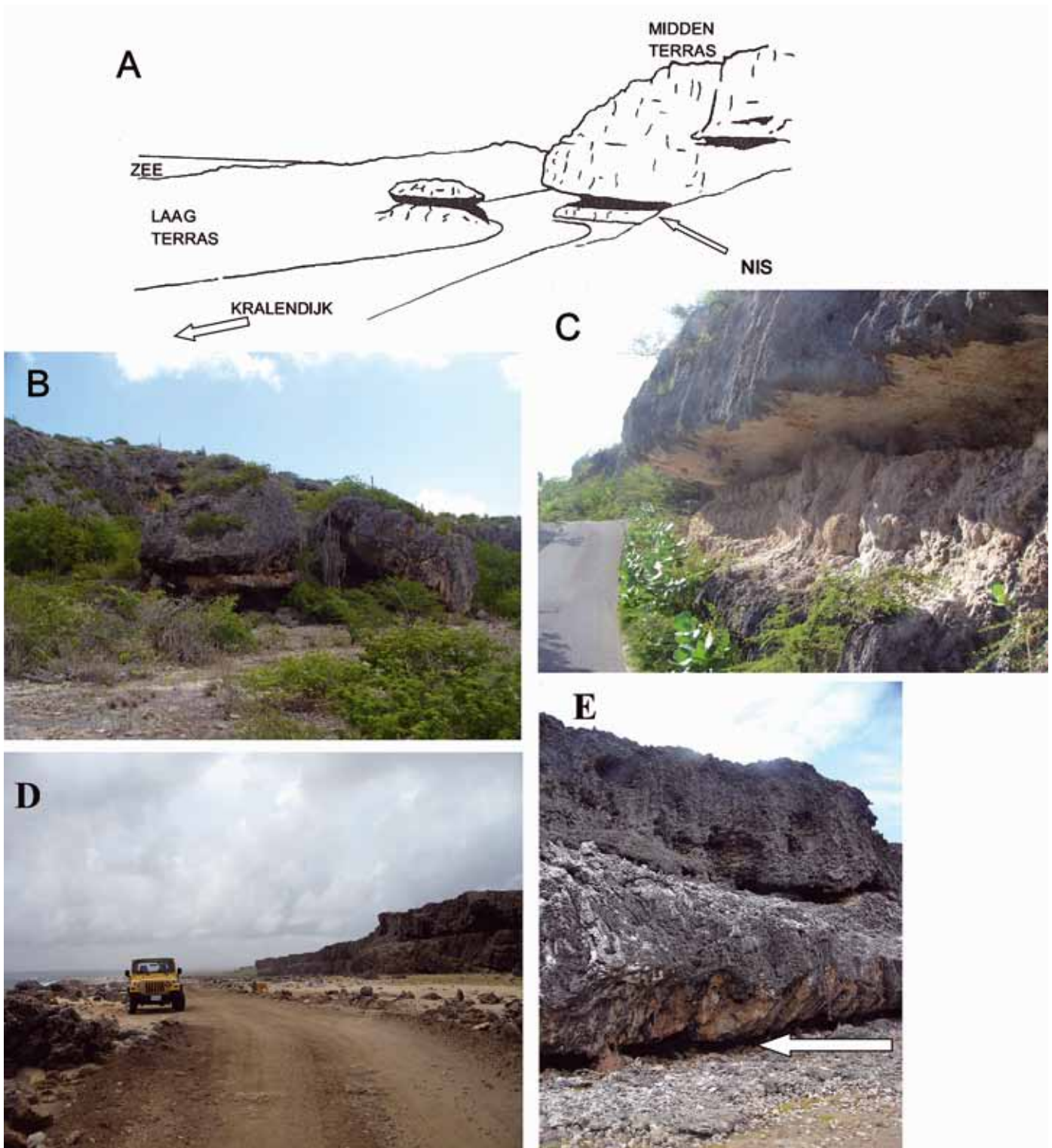
Een tweede nis bevindt zich onder water onder de uitstekende bank. Deze nis ontstaat door een combinatie van bio-erosie en de eroderende werking van golven die kalkzand en koraalpuin meevoeren. Ten slotte is er een uitstekende bank met aan het uiteinde de aangroeizone. Deze zone wordt o.a. bevolkt door kalkafscheidende algen, zichtbaar in de nis in afb. 6B als roze plekken. Zo ontstaat de uitstekende bank (ook wel sawa-bank genoemd) die permanent overspoeld wordt door de aanrollende golven. De aangroei is maximaal waar de waterbeweging het hevigst is. De kalkvormende algen gaan dood als het water rustig kabbelt. Men vindt daarom aan de lijzijde geen uitstekende bank maar wel de bovenste nis die door het oplossen van kalk ontstaat. De onderste nis is wel aan de lijzijde aanwezig en vormt één geheel met de oplossingsnis (afb. 7A).

Midden-Terras: een fossiel terras

Om een nis van dichtbij te bekijken kan men met duikbril en snorkel aan de rustige lijzijde het water ingaan. Bij kalme zee is de nis onder water dicht te benaderen zodat de organismen die erop groeien bestudeerd kunnen worden. Net als bij de kora-

len kan men de (fossiele) nissen ook op het land bekijken. Wie van Kralendijk over de smalle en rustige 'Toeristenweg' richting Karpata rijdt, heeft een schitterend uitzicht over de zee. De weg voert deels over het Laag- en Midden-Terras. Tot aan Karpata komen we minstens twintig duiklocaties tegen; de namen staan op de geel geverfde stenen langs de weg. Bij Karpata splitst de weg; recht door gaat men richting Goto-meer, rechtsaf naar het dorpje Rincon. Ongeveer 1,5 km vóór deze afslag maakt de kustweg, het Midden-Terras volgend, een halve lus naar binnen. Op de Bonaire Tourist Map wordt deze plek aangeduid met 'Devil's Mouth'. Het is de moeite waard hier te stoppen. De kalksteenformatie rechts van de weg behoort tot het Midden-Terras (afb. 8). Links van de weg tot aan de zee ligt het Laag-Terras. Tijdens de vorming van het Laag-Terras stond de zeespiegel hoger, ongeveer halverwege de nis. Er vormde zich een ondiepe lagune achter een barrièrerif. In de lagune groeiden koralen. Aan de landzijde spoelde de zee tegen het Midden-Terras, dat daardoor landinwaarts werd teruggedrongen. Toen de zeespiegel weer daalde bleef het steile klif met nis langs de weg over. De geringe amplitude van de golven in de lagune heeft ervoor gezorgd dat de hoogte van de nis klein is. Door erosie van de laguneafzettingen is het Laag-Terras geworden zoals het nu is. Aan de loefzijde (afb. 8D,E) bij Seru Grandi zien we rechts een deel van het Midden-Terras en in afb. 8E bij de pijl zien we de nis nog net. Het Laag-Terras is aan de loefzijde beter ontwikkeld dan aan de lijzijde.

Kalksteen in diverse vormen bepaalt voor een groot deel het



Afb. 8. Midden-Terras aan de lij- en loefzijde.

A. Laag- en Midden-Terras aan de lijzijde van Bonaire bij Karpata. De oplossingsnis in het Midden-Terras is tijdens de vorming van het Laag-Terras ontstaan. De nis was hier zo diep dat er een stuk van het terras is afgebroken. In de tekening zien we dat rondom het losse blok ook weer een nis is ontstaan. Dergelijke 'paddenstoelachtige' kalksteenblokken komt men regelmatig aan de kust tegen. (Tekening uit Field trip of a general nature to Bonaire, GUA Papers of Geology Series 1, No 10-1977.) Waar tegenwoordig het Laag-Terras bij Karpata aan de zee grenst (afb. 7B), ziet men ook een dergelijke nis. B. Het losse blok uit afb. A (links van de weg) met op de achtergrond het Midden-Terras. De foto is richting Kralendijk genomen. C. Het Midden-Terras met nis. D. Laag- en Midden-Terras aan de loefzijde bij Seru Grandi. De foto is vanaf het Laag-Terras genomen. E. Detail van het Midden-Terras (de pijl wijst naar de nis).

beeld van de ABC-eilanden. Maar Bonaire heeft meer te bieden. Een bezoek aan het Nationaal Park Washington Slagbaai is zeker de moeite waard. De oudste (vulkanische) gesteenten – het Noord-Complex van de vulkanische formatie op Bonaire (afb. 3) – liggen in dit park. Een verslag van een tocht door Nationaal Park Washington Slagbaai vindt u op de website.

Nationaal Park Washington Slagbaai

Nationaal Park Washington Slagbaai was het eerste natuurreservaat van de toenmalige Nederlandse Antillen. Het park beslaat het noordwestelijk deel van Bonaire en is ongeveer 6000 ha groot. De naam is afkomstig van twee plantages: plantage Washington en plantage Slagbaai. In 1969 werd het park geopend.



Afb. 9. Tonaliet/kwartsdiorietblokken op Aruba.

Op Bonaire en ook op Curaçao komt kwartsdioriet in zeer beperkte mate voor. Op Aruba zijn deze blokken de bovengrondse resten van een grote batholiet die ongeveer 89 miljoen jaar geleden gevormd werd.

Het bestond toen uit de plantage Washington, een vlak gebied met veel cactussen, acacia's en dividivi's. In 1979 werd het park uitgebreid met plantage Slagbaai waardoor het nu het gehele noordwestelijke deel van Bonaire beslaat. Het beheer is in handen van Stinapa (Stichting Nationale Parken). Voor Antilliaanse begrippen ziet het gebied er opvallend groen uit, vooral op de plekken waar zoetwaterbronnetjes liggen. Enkele bekende bronnen zijn put Bronswinkel, Pos Mangel, Pos Nobo (Pos betekent put). Voor vogelwaarnemingen zijn dit de beste plekken! Voordat de Europeanen kwamen was Bonaire rijk aan bossen. Sindsdien is er veel gekapt: hout was een belangrijk uitvoerproduct. De kolonisatie heeft de natuur op het eiland voor een groot deel verwoest. Voor de export werd verfhout (*Haematoxylum brasiliense*, rode verf) en pokhout (*Guaicum officinale*, Ant.: Wayaká) gekapt. Ook werd hout gekapt voor de productie van houtskool, die ook uitgevoerd werd, en moesten bossen wijken voor het verbouwen van aloë. Deze kaalslag is tot ver in de 19e eeuw doorgegaan.

'In den aanvang waren er vulkanen'

Zo begint de Utrechtse hoogleraar prof. L.M.R. Rutten in 1933 zijn verhaal over de geologische geschiedenis van de drie eilan-



den. De geoloog Rutten deed met een aantal studenten in 1930 onderzoek op de ABC-eilanden. Onder zijn leiding werd een uitgebreide geologische inventarisatie van Aruba (dissertatie van J.H. Westermann, 1932) en Bonaire (dissertatie van P.J. Pijpers, 1933) uitgevoerd. Curaçao was een paar jaar eerder al door G.J.H. Molengraaff onderzocht. De dissertaties van deze drie heren heeft lange tijd als leidraad voor verder onderzoek gediend.

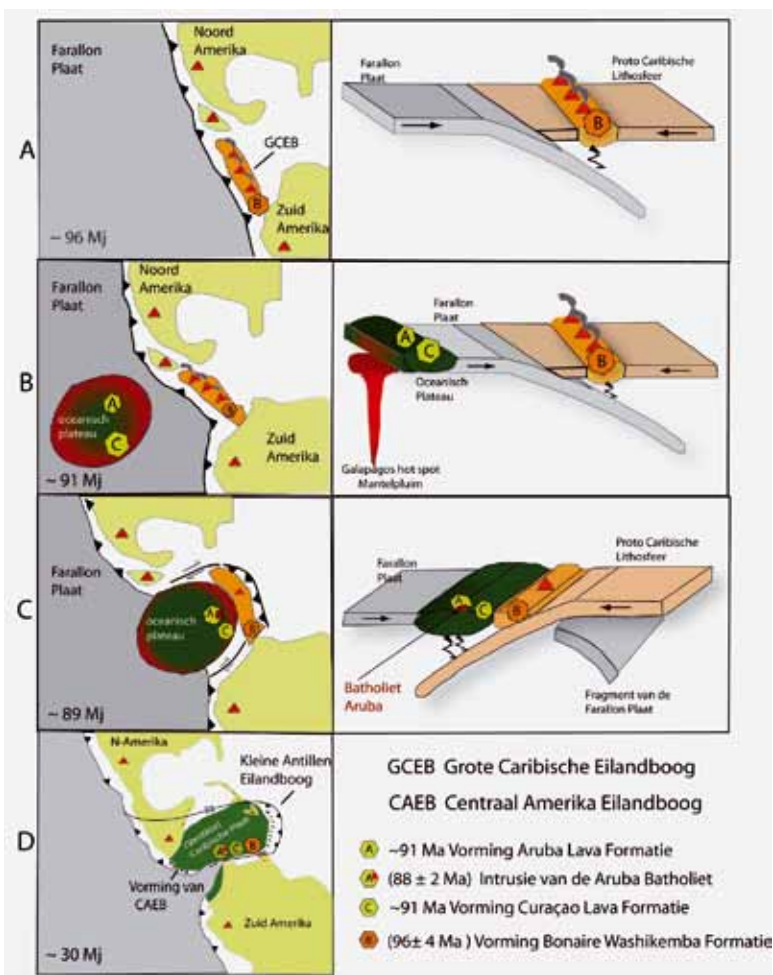
De oudste gesteenten van de eilanden zijn inderdaad vulkanisch. Op de kaart (afb. 1) ziet men Aruba, Bonaire en Curaçao een eilandenboog vormen met een aantal kleinere Venezolaanse eilanden. Het is geen vulkanisch actieve eilandboog zoals de boog waartoe ook Saba en Sint Eustatius (Statia) behoren. Men zou de indruk krijgen dat de eilanden een gemeenschappelijke geologische oorsprong hebben. Dat is lange tijd dan ook de opvatting geweest. Er zijn soms heel opvallende verschillen, zoals de grote verweringsblokken tonaliet/kwartsdioriet (afb. 9) die alleen op Aruba voorkomen en daar één van de toeristische attracties vormen. Het zijn de bovengrondse resten van een grote batholiet. Bij nadere bestudering blijkt dat de vulkanische formatie op Bonaire verschilt van die van beide andere eilanden (afb. 10). Bonaire heeft een andere geologische geschiedenis dan Aruba en Curaçao; het is op een andere plek ontstaan en is door ingewikkelde tektoniek naast de andere twee eilanden terechtgekomen.

Een mogelijk scenario voor het ontstaan van het Caribisch gebied

Al jaren wordt een hevige discussie gevoerd over de vraag hoe het Caribisch gebied ontstaan is. Het staat vast dat er door het uiteendrijven van Noord- en Zuid-Amerika ruimte kwam die geleid heeft tot de vorming van een Caribische plaat. Ook staat vast dat de onderkant van de Caribische plaat grotendeels uit Pacificische oceaankorst bestaat die verdikt is door de vorming van een oceanisch plateau. De meeste onderzoekers zijn van mening dat dit oceanisch plateau in de Pacific ontstaan is (Pacific-model). Sommigen zijn van mening dat de Caribische plaat met het oceanisch plateau een Atlantische oorsprong heeft (Atlantic-model). De details van elk van deze modellen zijn ook weer aan discussie onderhevig. Een recent overzichtsartikel dat deze twee modellen bespreekt is op internet te vinden (T. Ramamohana Rao, 2008). Het Pacific model wordt hieronder besproken (zie ook afb. 11).

200 miljoen jaar geleden begon het supercontinent Pangea scheuren te vertonen. Het begon langzaam uiteen te drijven, om te beginnen in de Noord-Atlantische zone; hier vormde zich de Atlantische Oceaan. Ook Noord- en Zuid-Amerika begonnen uit elkaar te drijven. Tussen deze twee in noordwestelijke richting bewegende continenten ontstond een opening waarbij zich uit de spreidingsruggen (rifting) nieuwe oceanische korst vormde (Proto-Caribische plaat, samenstelling MORB = Mid-Oceanische Rug Basalt). Vanuit de Pacific schoof de Farallonplaat onder de Proto-Caribische plaat. Tegenwoordige resten van deze Farallonplaat zijn de Juan de Fuca-, Cocos- en Nazcaplaat. Het resultaat van deze subductie was een eilandenboog (GCEB, afb. 11A). Ongeveer 91 miljoen jaar geleden werd er op de Farallonplaat onder zeeniveau een grote hoeveelheid basalt als een oceanisch plateau afgezet (afb. 11B).

Afb. 10. Zuilen van rhyodaciet in Park Washington-Slagbaai. Zuilen met deze samenstelling komen alleen op Bonaire voor. Vulkanieten op Bonaire hebben een andere samenstelling dan die van Aruba en Curaçao.



Afb. 11. Een mogelijk scenario (Pacific-model) voor de vorming van de huidige Caribische plaat met daarop Bonaire, Aruba en Curaçao:

A. 96 miljoen jaar geleden

De Farallonplaat schuift vanuit de Stille Oceaan naar het noordoosten en duikt onder de Proto-Caribische plaat die zich tussen Noord- en Zuid-Amerika bevindt. Bonaire zou ontstaan zijn als deel van de actieve vulkanische eilandboog GCEB (Grote Caribische Eilandboog), die door deze subductie gevormd werd.

B. 91 miljoen jaar geleden

Een hot spot op de plek van de Galapagos-eilanden zorgt voor een onderzeese uitvloeiing van een enorme hoeveelheid magma dat zich op de Farallonplaat afzet. De oceaankorst is door deze uitstoot verdikt, er is een oceanisch plateau gevormd. De samenstelling van het basalt van dit plateau wijkt op een paar details af van de middenoceanische basalten (MORB). De samenstelling van de oudste vulkanische gesteenten op Aruba en Curaçao komt overeen met die van dit oceanisch plateau. Men meent daarom dat beide eilanden tijdens de vorming van dit plateau in de Pacific ontstaan zijn.

C. 89 miljoen jaar geleden

De Farallonplaat met daarop het oceanisch plateau is verder geschoven en botst nu tegen de eilandboog. De plaat met daarop het nog warme oceanische plateau heeft hierdoor een kleinere dichtheid en is niet in staat om onder de Proto-Caribische plaat te duiken. De richting van de subductie keert om (polarity flip). De Proto-Caribische plaat duikt nu onder de Farallonplaat met daarop het oceanisch plateau. Het gevolg is dat de eilandenboog onder druk komt te staan, er vindt metamorfe omzetting plaats. Tijdens deze nu westwaarts gerichte subductie ontstaat plutonisch gesteente met een samenstelling die voor een deel TTG (trondhjemitisch, tonalitisch, granodioritisch) is. Dit is ook de samenstelling van de grote batholiet op Aruba (afb. 9). Over dit plutonisch vormingsproces wordt nog steeds gediscussieerd.

Het oceanisch plateau schuift als gevolg van de botsing van de Farallonplaat af en gaat met een deel ervan boven op de pas gevormde Proto-Caribische lithosfeer en samen met de GCEB, in noordoostelijke richting verder.

D. 30 miljoen jaar geleden

De Caribisch verdikte plaat is op weg naar zijn huidige positie. Delen van het oceanisch plateau, maar ook van de oorspronkelijke oceaankorst en van de eilandenboog, worden aan de randen op de Zuid-Amerikaanse plaat afgezet. De ABC-eilanden komen zo naast elkaar te liggen ongeveer op de huidige positie. De voorkant van de plaat botst tegen het Atlantische deel van de Zuid-Amerikaanse plaat en deze laatste duikt onder de Caribische plaat. Zo ontstaat de vulkanische eilandenboog van de Kleine Antillen. Aan de achterkant van de Caribische plaat wordt een nieuwe eilandboog gevormd, de Centraal-Amerika-eilandboog, de voorloper van de landengte tussen Noord- en Zuid-Amerika. (Afb. 9 naar Thomson e.a. (2004), White e.a. (1999).)

(meer dan 5 km) dan gemiddelde oceanische korst. Al deze resultaten doen vermoeden dat de lavaformaties van beide eilanden afkomstig zijn van het oceanisch plateau dat zijn oorsprong heeft in de Pacific.

Om dergelijke onderzeese plateau-basalten te laten ontstaan heeft men een mantelpluim als verklaring gezocht. Mantelpluimen ontstaan diep in de mantel, in de buurt van de grens met de buitenkern, is de gedachte. Een hoeveelheid mantelmateriaal, relatief heter en daarom lichter maar nog steeds vast, stijgt op. Als de kop van de pluim de onderkant van de lithosfeer bereikt, zal een deel door de drukvermindering smelten. Door de hogere temperatuur smelt er meer peridotitisch (olivijnrijk) mantelmateriaal waardoor het MgO-gehalte toeneemt. Breekt de mantelpluim door de lithosfeer heen, dan worden grote hoeveelheden van dit hete magma aan de oppervlakte afgezet; onder water levert dit een oceanisch plateau op. De samenstelling van dit uitgestroomde magma met een hogere temperatuur is anders dan de samenstelling van het magma dat uit de oceanische spreidingsruggen komt (MORB). Eén van de opvallende

Mantelpluimen zouden de oorzaak zijn geweest van deze enorme basalterupties. Over de uit 1971 stammende mantelpluim-hypothese is overigens nog steeds veel discussie ('Great Plume Debate'). Deze mantelpluim zou ter hoogte van de Galapagos-eilanden hebben gelegen. In de beginjaren '70 van de vorige eeuw ontdekten men met behulp van seismische metingen en diepzeeboringen dat op verschillende plekken in de oceanen de korst aanzienlijk verdikt was. Een dikte van 6 tot 7 km is normaal, maar op sommige plekken heeft de oceaankorst een dikte van meer dan 30 km. Ook bij de Caribische plaat wordt een abnormale verdikking vastgesteld. Deze plaatvormige verdikkingen blijken te bestaan uit basalt en vormen wat men tegenwoordig een *oceanisch plateau* noemt.

Ook op land komen uitgestrekte basaltvelden voor, bijvoorbeeld de Deccan Traps in India en het Columbia River Plateau in de VS. Ze worden algemeen aangeduid met de afkorting LIP (Large Igneous Province). De LIP van het Caribisch gebied heeft de afkorting CCOP (Caribbean-Colombian Oceanic Plateau). De samenstelling van de basalt van deze CCOP wijkt iets af van de de Mid-Oceanische Rug Basalten (MORB).

Aruba en Curaçao deel van de Caribische LIP

Op Curaçao werd de samenstelling van de Curaçao Lava Formatie (CLF) door G. Klaver onderzocht (dissertatie 1987). R.V. White e.a. (1999) onderzochten de Arubaanse Lava Formatie (ALF) en vonden dat de samenstelling vergelijkbaar is met die van Curaçao. De samenstelling van beide lavaformaties, uit het Midden-Krijt, wijkt – net als die van het CCOP – iets af van de MORB. Ook blijkt de Curaçaose lavaformatie veel dikker te zijn



Afb. 12. De vorming van de Caribische plaat heeft in een groot deel van het Caribisch gebied zijn sporen achtergelaten.

1. Resten van de oceanische korst

Deze hebben een Pacificische en Proto-Caribische oorsprong. De samenstelling is: MORB (Mid-Oceanische Rug-Basalten). De meeste van deze basalten zijn door metamorfose zodanig omgezet dat ze nauwelijks nog herkenbaar zijn als oceanische korstgesteente.

2. Resten van het oceanisch plateau

De lavaformaties op Aruba (ALF) en ook op Curaçao (CLF) zijn omhooggeschoven resten van dit oceanisch plateau. Op veel eilanden in het Caribisch gebied en op het vasteland van Zuid- en Midden-Amerika worden deze plateauresten teruggevonden.

3. Resten van de Proto-Caribische eilandboog: de 'Great Arc'

Deze resten vormden eens de Grote Caribische Eilandboog (GCEB) waarvan Bonaire deel uitmaakte. Nu liggen ze verspreid over het gehele Caribische gebied. (Afbbeelding naar Kerr, 2003.)

verschillen is het hoge MgO-gehalte. Op Curaçao en ook op Aruba komen nu vulkanieten voor met een hoog MgO-gehalte, wat wijst op een oorsprong als oceanisch plateau.

Onderzoek aan oceanische plateaubasalten is vaak lastig omdat ze zich onder water bevinden. Het Caribisch gebied vormt hierop een uitzondering. Delen van de Caribische plaat zijn tijdens hun lange ontstaansgeschiedenis op sommige locaties omhooggeschoven en bevinden zich nu boven water. De vulkanische formatie op Aruba (de Aruba-Lava-Formatie (ALF) en de Curaçao-Lava-Formatie (CLF)) zijn dergelijke omhooggeschoven plateauresten.

Bonaire heeft geen LIP

Bonaire blijkt een totaal andere ontstaansgeschiedenis te hebben. Bonaire ontstaat als het zuidelijkste deel van de grote vulkanische eilandboog, het resultaat van subductie van de oceanische Farallonplaat onder een oceanische Proto-Caribische plaat (afb. 11A). De vulkanische formatie op Bonaire wordt de Bonaire Washikemba Formatie (BWF) genoemd. De samenstelling is bimodaal (er komen zowel SiO₂-arme als SiO₂-rijkere vulkanieten voor): onderzees gevormde basalten, dolerieten, rhyodacieten met inschakelingen van vulkanoklastische afzettingen, afgewisseld met kiezelrijke kalksteen. Ouderdomsmeting aan een aantal monsters heeft uitgewezen dat de formatie gevormd is in een periode die loopt van Midden-Albien tot het Cenomanien (106 tot 98 Ma) (Wright en Wyld, 2011). De verspreide resten van deze boog, de Grote Caribische Eilandboog (GCEB) of de 'Great Arc', zijn tegenwoordig behalve op Bonaire ook terug te vinden op de

eilanden van de Grote Antillen, de onderzeese Aves Rug, in Colombia en Ecuador (afb. 12). De vulkanische formaties op Aruba en Curaçao zijn iets jonger: beide zijn ontstaan in het Turoon, de ALF ~ 91 Ma, de CLF iets eerder (afb. 11B).

Samengevat:

De BWF heeft (geochemische) kenmerken van eilandboogvulkanisme. De BWF bevat geen oceanische plateaubasalten, maakt geen deel uit van het LIP en is dus onafhankelijk van de ALF en CLF ontstaan. Het oceanisch plateau heeft alleen als transportmedium gediend (Thompson e.a. 2004).

De laatste fase

Bonaire is samen met Aruba en Curaçao op het oceanisch plateau, dat nu deel uitmaakt van de nieuwe Caribische plaat, in oostelijke richting meegevoerd (afb. 11C,D). Deze plaat heeft zich nu genesteld tussen de Noord-Amerikaanse en de Zuid-Amerikaanse plaat. Tijdens deze beweging 'schuurde' de Caribische plaat langs de continentale platen en werden er fragmenten van o.a. het oceanisch plateau op afgezet (afb. 12). De drie eilanden zijn samen met de Venezolaanse eilanden door deze botsing van beide platen omhooggeschoven en op de rand van het Zuid-Amerikaanse continent terecht gekomen (afb. 11D). De voorkant van de Caribische plaat botste tegen het Atlantische deel van de Zuid-Amerikaanse plaat en deze laatste dook onder de Caribische plaat. Deze nieuwe subductiezone ontstond ongeveer 38 Ma geleden. Het resultaat is de vulkanische eilandboog van de kleine Antillen waar Saba en Sint Eustatius liggen.

Nederlandse geologen hebben de basis gelegd, maar spelen in het onderzoek over Bonaire tegenwoordig geen rol van betekenis meer. Hun rol is overgenomen door geologen uit de Caribische regio, Engeland en de VS. Bonaire is zeer recent nog onderzocht door James Wright en Sandra Wyld van de universiteit van Georgia, USA (2011). Zij zetten vraagtekens bij de tot nu toe veronderstelde stratigrafische eenheid van de Washikemba Formatie. De geologische geschiedenis van Bonaire is dus nog niet af en nieuw onderzoek zal zeker nodig zijn.

Bronnen

- Beets D.J., Mac Gillavry H.J., Klaver G.Th. (1977) Volcanic-sedimentary facies associations in the Washikemba Formation. Abstracts of the VIIth Caribbean Geological Conference Curaçao, GUA papers of Geology, Series 1 No 9: 13,14 .Volledig verslag in Geologie en Mijnbouw v57 : 97-384.
- Herweijer JP, De Buissonje PH, Zonneveld JIS, 1977. Neogene and Quaternary geology and geomorphology. In Guide to the Field Excursions on Curaçao, Bonaire and Aruba, Netherlands Antilles, 8th Caribbean Geological Conference, Curaçao, 9-24 July, 39-55. Amsterdam: Geologisch Instituut.
- Kerr A.C., White R.V., Thompson P.M.E., Tarney J., Saunders A.D., (2003) No Oceanic Plateau No Caribbean Plate? The seminal role of an oceanic plateau in Caribbean Plate evolution. AAPG Memoir 79: 126-168.
- Ramamohana Rao, T. (2008) Geological evolution of the Caribbean plate: Some critical aspects in the two divergent models, Current Science, vol 95, no 6.
- Thompson P.M.E., Kempton R.D., White R.V., Saunders A.D., Kerr A.C., Tarney J., Pringle M.S, (2004) Elemental HF-Nd isotopic and geochronological constraints on an island arc sequence associated with the Cretaceous Caribbean plateau: Bonaire, Dutch Antilles. Lithos 74 :91-116.
- White R.V., Tarney J., Kerr A.C., Saunders A.D., Kempton P.D., Pringle M.S., Klaver G.Th., (1999) Modification of an oceanic plateau, Aruba, Dutch Caribbean: Implications for the generation of continental crust. Lithos, v46 : 43-68.
- Wright J.E., Wyld S.J. (2011) Late Cretaceous subduction initiation on the eastern margin of the Caribbean-Colombian Oceanic Plateau: One great arc of the Caribbean? Geosphere; april 2011; vol 7; no.2: 468-493.