

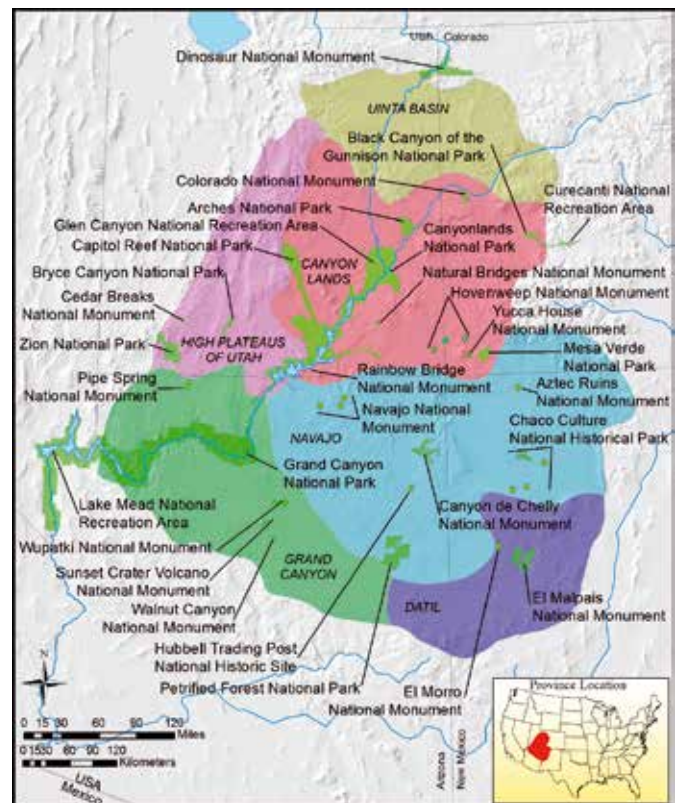
Het Colorado Plateau – een geologisch wonderland (deel 1)

door Anne Rutger Fortuin
anne.fortuin@casema.nl

Het Middenwesten van de Verenigde Staten is rijk gezegend met kleurige en indrukwekkende landschappen, waarbij die van de nationale parken op het Colorado Plateau eruit springen. Al in de 19^e eeuw liet de Amerikaanse regering zich door natuurvorsers overtuigen dat het in het landsbelang zou zijn om de mooiste delen van deze gebieden te beschermen tegen aantasting door de mens. Zo werd het enorme Yellowstone in 1872 het eerste officiële park. De meeste Nationale Parken (NP's) werden echter in de loop van de 20^e eeuw gesticht. Daarnaast zijn er ook nog National Monuments (NM's), die juridisch een iets andere status hebben, maar verder hetzelfde zijn. De inmiddels tot een grote organisatie uitgegroeide National Park Service beheert in totaal 28 NM's en NP's op het Colorado Plateau. Deze bijdrage is het eerste deel van een geologische kennismaking met een aantal van de bekendste parken.

Met een oppervlak van 337.000 km² is het Colorado Plateau (afgekort CP) ruim acht keer groter dan Nederland en allerlei stukken zijn nu gereserveerd voor de parken (afb. 1). De mooiste delen daarvan zijn vaak goed bereikbaar gemaakt voor gemotoriseerd publiek. Hierdoor en mede dankzij de hoge vlucht van digitale fotografie en internet is de veelkleurige schoonheid van de CP-parken wereldberoemd. Helaas hebben relatief weinig reizigers een idee van de onderliggende geologie. Voor mij als sedimentair geoloog en liefhebber van fotografie was het een aansporing om me daar eens in te verdiepen, mede door een tweetal reizen door deze en andere westelijke gebieden van de VS. Kijken en genieten van het landschap waar je doorheen reist is mooi, maar nog mooier is het als je iets van de geologische opbouw weet. Deze bijdrage zou ik niet hebben kunnen maken zonder de ruime beschikbaarheid van vakliteratuur en websites over het Colorado Plateau.

Alweer jaren geleden reisde ons gezin per camper een maand door het westen van de Verenigde Staten. Qua landschap bleek de Grand Canyon de meeste indruk te maken. Na aankomst op de camping wandelden we tegen zonsondergang naar de rand van de canyon. Dat plots daarachter opduikende immense landschap in de diepte, met die ongelofelijk diepe stilte boven een veelkleurige en nagenoeg naakte aarde, maakte echt emotie los. Geen tranen, maar zwigend en kijkend willen opgaan in die gewijde stilte. Minuten sprakeloosheid. Een ander hoogtepunt – ook in topografisch opzicht – was het kamperen in het hoog gelegen Bryce Canyon onder de superheldere nachtelijke sterrenhemel. Enfin, we vonden de diverse parkervaringen zo bijzonder, dat we de kennismaking in een later stadium ooit wilden hernieuwen en verder uitbreiden. Enkele erosie-aspecten werden verwerkt in een Gea-artikel over aardpyramides (Gea, dec. 2005). Die latere tweede rondreis, van opnieuw ruim 6000

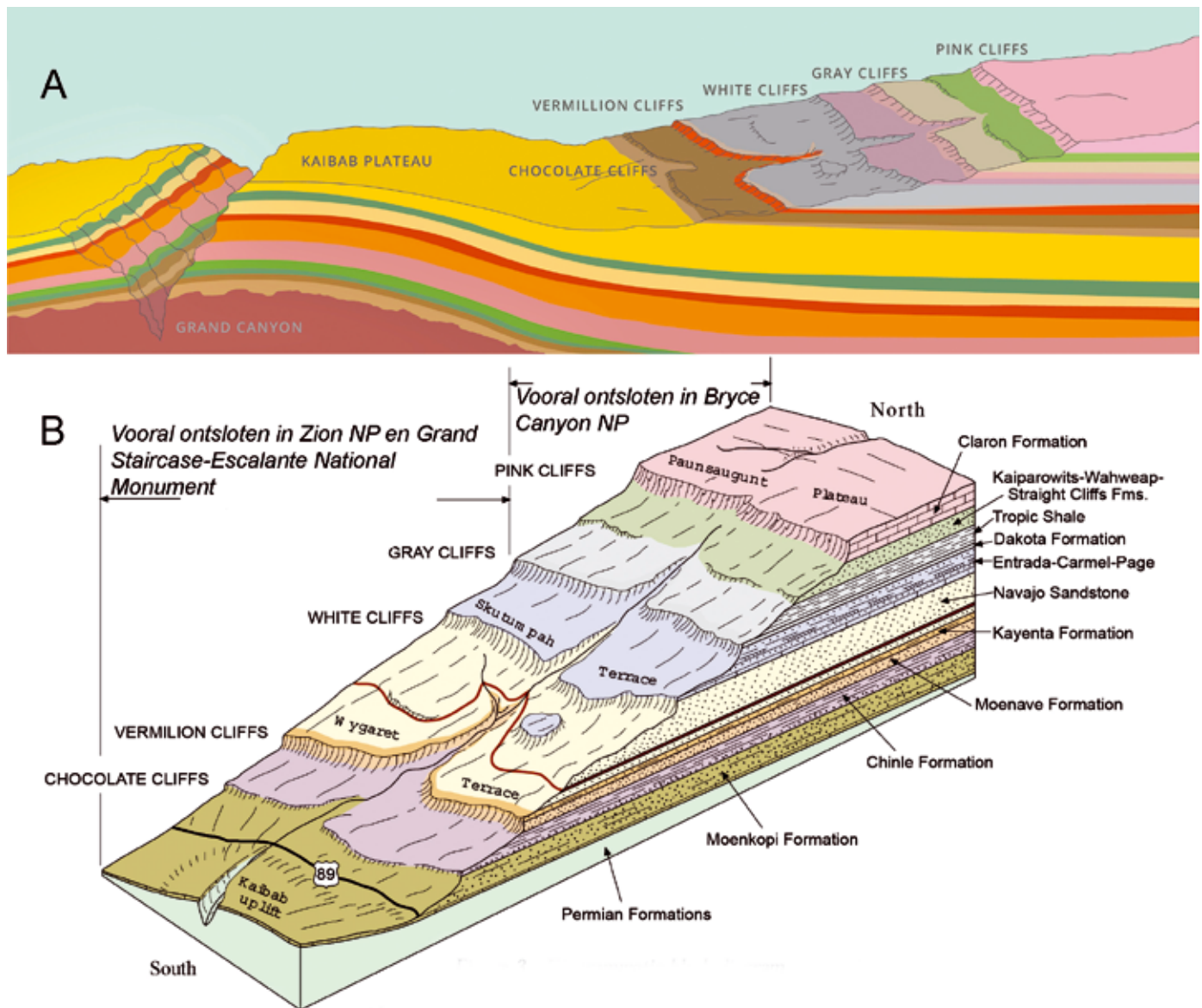


Afb. 1. Het Colorado Plateau en zijn vele nationale monumenten, resp. parken is gelegen in vier staten (de staatsgrenzen zijn in grijs aangegeven). De inzet rechtsonder geeft de ligging in het middenwesten van de VS aan. De loop van de Colorado Rivier is tevens aangegeven.
Bron: website National Park Service.

km, is inmiddels al weer een paar jaar geleden en daarbij wilden we deze twee parken, die meteen ook de oudste en de jongste lagen van het plateau tonen, opnieuw bezoeken.

Een aparte geologische provincie

Het Colorado Plateau beslaat flinke delen van de staten Arizona, New Mexico, Colorado en Utah (afb. 1). In geologisch opzicht is dit een aparte provincie, die wordt gekenmerkt door relatief weinig tektonische deformatie bij tegelijkertijd een sterke opheffing van rond 2 km, wat nu de gemiddelde hoogte van het plateau is. De opwelling van het Kaibab Plateau, met daarin ingesneden de Grand Canyon (afb. 2), ligt ca. 2200 m hoog,



Afb. 2. Schematische noord-zuid georiënteerde overzichten van de geologische opbouw van de 'Grand Staircase' en de benaming van de morfologisch herkenbare reliëftrappen. A. Profielschets vanaf het door de Colorado Rivier ingesneden Kaibab Plateau. B. Blokdiagram van de 'Grand Staircase'-opeenvolging, met de bijbehorende formatie-indeling aan de rechterkant. Niet op schaal. Naar: Doelling et al, 2000.

terwijl de hoogste en jongste lagen tot ongeveer 4000 m kunnen reiken. De aangrenzende gebieden van het CP zijn veel intenser gedeformeerd, vooral naar het westen toe met zijn plooigordels en de Rocky Mountains naar het noordoosten. De geologische gesteldheid van de regio hangt direct samen met de plaattektonische situering die bepaald wordt door botsing van Pacifische oceaankorst (wegduikende Farallon Plaat) en het Noord-Amerikaanse continent, met alle gevolgen van dien aan gebergtevorming, vulkanisme en dergelijke.

In klimatologisch opzicht is het Colorado Plateau erg droog. Dit semi-aride klimaat maakt sommige delen woestijnachtig. Echte woestijngebieden liggen iets verder naar het zuiden. In de hoogste regionen is wel iets meer regenval. Ondanks de droogte wordt het gebied doorsneden door enkele grote rivieren, zoals de Colorado River, met de zijrivieren Green River, San Juan River en Little Colorado. Doordat het gebied flink is opgeheven konden deze rivieren zich soms diep insnijden, een fenomeen dat zich het sterkst in de Grand Canyon voordoet door de opwelling van het Kaibab Plateau. Daar heeft de rivier zich tot ruim 1500 m diep moeten insnijden om de oceaan te kunnen blijven bereiken, met het bijbehorende spectaculaire landschap tot gevolg.

Landschap in afbraak

Het bijzondere van het Colorado Plateau is dat de veelkleurige sedimenten, die samen een bijna 5 km dik pakket vormen, onder een geringe hoek (ca. 2°) noordwaarts gekanteld zijn vanaf het Grand Canyon-gebied (afb. 2). Er is heel wat geologische discussie gevoerd over de ouderdom van de opwelling van het Kaibab Plateau en daaraan gekoppeld de snelheid van insnijding. De meest gangbare opvatting is dat deze opwelling een jong gebeuren is, dat pas sinds de laatste 6 miljoen jaar aan de gang is. De proto-Colorado Rivier zou eerst een wat noordelijker afwatering gehad hebben, maar werd vanuit het zuiden aangetapt door een rivierstelsel dat naar de Golf van Californië afwaterde. Vervolgens is door insnijding en terug schrijdende erosie van het nieuwe riviersysteem een groot deel van de sedimentaire bedekking verdwenen en kom je noordwaarts in de hogere, maar jongere lagen.

Je moet je bij bezoek aan het Colorado Plateau dus goed realiseren dat er tot kilometers dikke pakketten door de erosie zijn afgevoerd richting zee. Het is een landschap in afbraak. Het eindresultaat van deze reliëfontwikkeling is dat je vanaf de bodem van de Grand Canyon tot aan de jongste lagen van het plateau een gigantisch stuk aardgeschiedenis kunt volgen: vanaf het Precambrium tot in het Tertiair; inderdaad uniek!



Afb. 3. Overzicht van Raplee Monocline bij Mexican Hat, een plooistructuur ca. 40 km oostelijk van Monument Valley. Merk op dat dezelfde bruinrode lagen (Onder-Perm; daaronder grijsbruin Boven-Carboon) die de heuvelkam vormen op de voorgrond weer vlak liggen.

De geologische bouw mag dan in grote lijnen simpel zijn, in werkelijkheid is er een flinke verscheidenheid aan plooiën en breuken. Met name zijn er diverse 'uplifts': door breuken in de ondergrond omhoog geduwde stukken korst. Deze uplifts (horsten) kunnen meer dan 100 km lang en 30 km breed zijn. Aan de randen worden ze vaak begrensd door monoclines. Een monocline is een traptrede-vormige plooi, waarbij de scheefgestelde lagen ombuigen naar de niet, of nauwelijks hellende lagen van het opgeheven-, respectievelijk gedaalde blok. De breuken in de ondergrond bereikten het oppervlak niet, omdat de jongere lagen plastisch reageerden en meebogen. Als voorbeeld hierbij de Comb Ridge, in Utah (afb. 3). De lagen kunnen tot meer dan 45° hellen, terwijl ze op het opgeheven blok en de voorgrond vrijwel horizontaal liggen.

De Grand Staircase

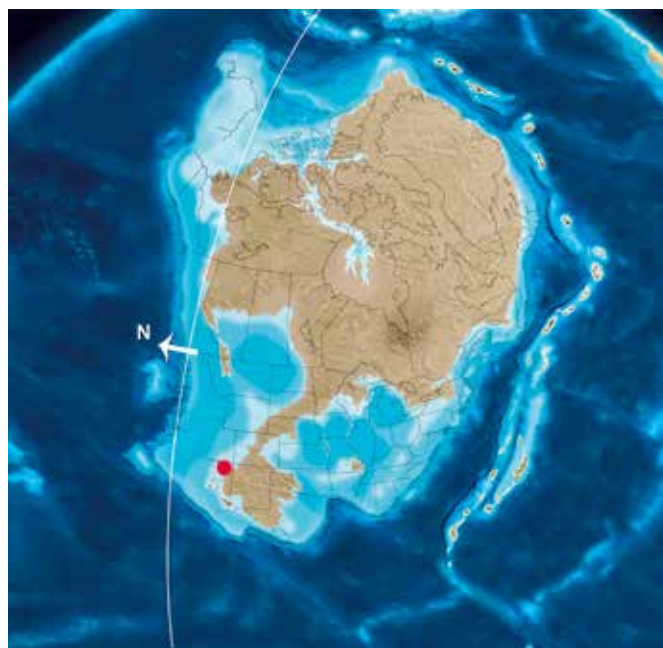
De Paleozoïsche en oudere gesteenten zijn vooral in de hellingen van de Grand Canyon te bekijken, ook al zijn dat zeker niet de enige plaatsen waar dat kan. Het merendeel van het Colorado Plateau bevat Mesozoïsche sedimenten, gevolgd door Paleogene afzettingen aan de top (afb. 2). De afwisseling van hardere en zachtere formaties, met daarbij verschillende overheersende kleuren, maakt het mogelijk om de hele opeenvolging in een aantal morfologische eenheden in te delen. De treden van deze stratigrafische trap worden bepaald door de harde formaties. Zij verweren langzaam en vormen plateau's, begrensd door steile wanden naar beneden (kliffen). Tussen de steile wanden en hun vlakke bovenkanten bevinden zich glooiende hellingen, waarin de zachtere eenheden dagzomen. Aldus wordt de hele morfologische en stratigrafische opeenvolging boven het Kaibab Plateau onderscheiden in vijf op hun typerende kleur gebaseerde treden, te weten de Chocolate Cliffs (Trias), de Vermilion Cliffs (oudere Jura), de White Cliffs (top Jura Navajo Sandstone), de Gray Cliffs (Krijt) en ten slotte de Pink Cliffs aan de top.

De formele lithostratigrafische indeling (afb. 2, rechts) van deze bonte serie gesteenten omvat een flink aantal formaties. Een formatie is per definitie een karteerbare gesteente-eenheid, gebaseerd op de som van de belangrijkste gesteente-eigenschappen van de ertoe behorende lagen. Formaties zijn nauwkeurig omschreven lithologische eenheden waarvan de beschrijving is gepubliceerd en de geografische verspreiding ook op geologische kaarten wordt aangegeven. In deze bijdrage krijgen vooral deze formaties en hun afzettingsmilieus aandacht. Daarbij zal opvallen dat de Paleozoïsche eenheden overwegend in ondiepe mariene milieus zijn afgezet en de Mesozoïsche vooral landafzettingen zijn (continentale milieus). In West Europa kennen we Jura en Krijt vooral als mariene afzettingen. Op het CP was dat vaak niet marien, terwijl het Paleozoïcum vooral sterk verplood en gebroken is bij de Hercynische gebergtevorming. Kortom, er zijn duidelijke verschillen, naast ook overeenkomsten. Dat laatste geldt vooral voor de tijd dat het supercontinent Pangea bestond. Kennissen vragen wel eens hoe het toch komt dat de midden

Amerikaanse landschappen zo anders zijn dan bij ons. Het antwoord is eigenlijk al gegeven, al moet hieraan toegevoegd worden dat ons vochtige zeeklimaat met zijn uitbundige plantengroei de ondergrond beschermt tegen erosie. Wij hebben geen semi-aride landklimaat met bijbehorende weerextremen en sterke erosie. Kortom, verschillen in de vroegere geologische situering, gekoppeld aan een andere plaat-tektonische ontwikkeling, plus het semi-aride (woestijn)klimaat op een hoog gelegen plateau maakt dat het daar totaal anders is.

De Paleozoïsche ontwikkelingsgang in vogelvlucht

Het Colorado Plateau maakt deel uit van het vroegere continent Laurentia. Dit komt overeen met een groot deel van Noord-Amerika, maar destijds hoorde ook Groenland erbij en zelfs een stukje van Schotland. Laurentia is ontstaan uit een samenraapsel van Archeïsche en Proterozoïsche continentale kernen, die ruim 1 miljard jaar geleden tot een geheel zijn gesmeed als onderdeel van het toen aanwezige supercontinent Rodinia. Rodinia viel uiteen en zo bevond Laurentia zich aan het begin van het Cambrium met het CP-gebied rond de evenaar (afb. 4; de rode stip geeft de positie van het centrum van het Colorado Plateau aan). Heel Laurentia bevond zich ruwweg tussen de keerkringen. Het CP-gebied maakte als kustnabij zeegebied deel uit van de westelijke passieve continentrand. Deze positie zou het gedurende het hele Paleozoïcum houden. Het aangrenzende oceaangebied, Panthalassa, zal uitgestrekt geweest zijn,

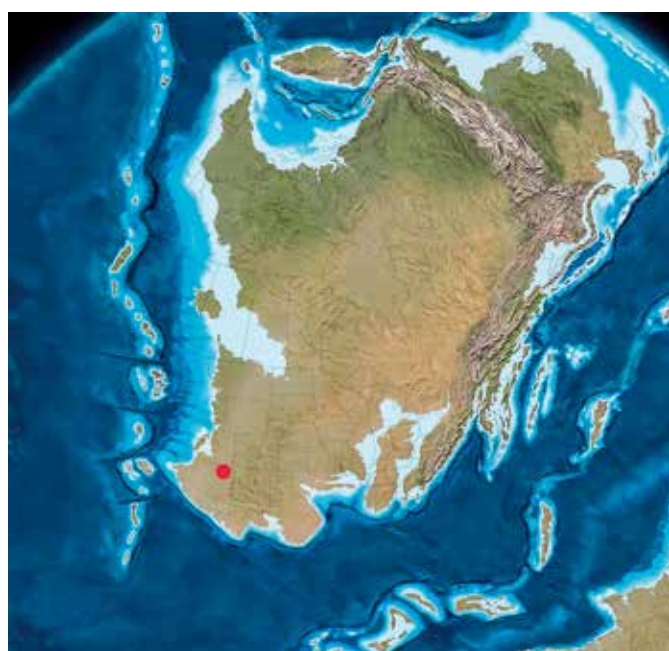


Afb. 4. Paleogeografische reconstructie van de Noord-Amerikaanse Plaat (Laurentia) tijdens het Midden-Cambrium (500 Ma geleden en in een positie rond de evenaar). De rode stip geeft de ligging van het Colorado plateau aan; de noordpijl geeft de toenmalige N-richting aan. Kaart door Ron Blakey, website *Global and Regional Paleogeography*, Northern Arizona University.

maar die Paleozoïsche oceaankorst is door subductie verdwenen. Laurentia lag in die tijd sterk naar het noorden gedraaid ten opzichte van nu. Vanaf het centrale vasteland nam de sedimentdikte naar het westen geleidelijk toe, omdat de gemiddelde bodemdaling richting oceaan groter was. Zo is het Cambrium bij Las Vegas dikker, vollediger en kalkrijker ontwikkeld dan in de Grand Canyon.

Van de daaropvolgende Systemen Ordovicium en Siluur zijn geen afzettingen aanwezig. Zijn ze er geweest, maar door erosie voor het Devoon weer verdwenen? Aan de tegenoverliggende kant van Laurentia is het in de loop van Ordovicium en Siluur onrustiger door het geleidelijke sluiten van de oceaan tussen

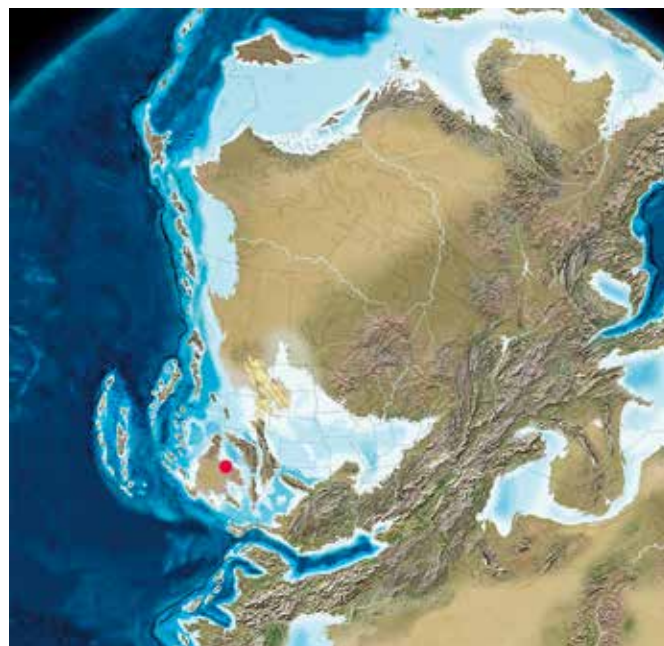
Laurentia en Baltica. De Caledonische (en in de VS Acadische) gebergtevorming heeft zijn hoogtepunt rond de grens Siluur-Devoon (~420 Ma). In samenhang met deze botsing roteert Laurentia enigszins antikloksgewijs, waardoor het CP-gebied in een wat zuidelijker positie terechtkomt. Pas vanaf het Laat-Devoon-Carboon wordt weer nieuw sediment toegevoegd in het CP-gebied. Er is dan in paleogeografisch opzicht nog maar weinig veranderd. De paleogeografische kaarten van Blakey (afb. 4 en 5) hebben helaas geen aanduiding van de geografische breedte. Het verschil tussen de continentale massa's van 500 en 400 Ma (1 Ma is de standaard afkorting voor mega-annum, oftewel een miljoen jaar) is duidelijk zichtbaar. Het is wel goed om te beseffen dat een gemiddelde plaatbeweging van 3 cm per jaar over een periode van 100 miljoen jaar neerkomt op 3000 km verschuiving. Er zal in zo'n tijdspanne heel wat oceaankorst subduceren en dat moet dus in de Panthalassa ook zijn gebeurd. Met als gevolg dat op zeker moment een vulkanische eilandboog voor de westelijke kust verschijnt, zoals aangegeven in afb. 4 en 5.



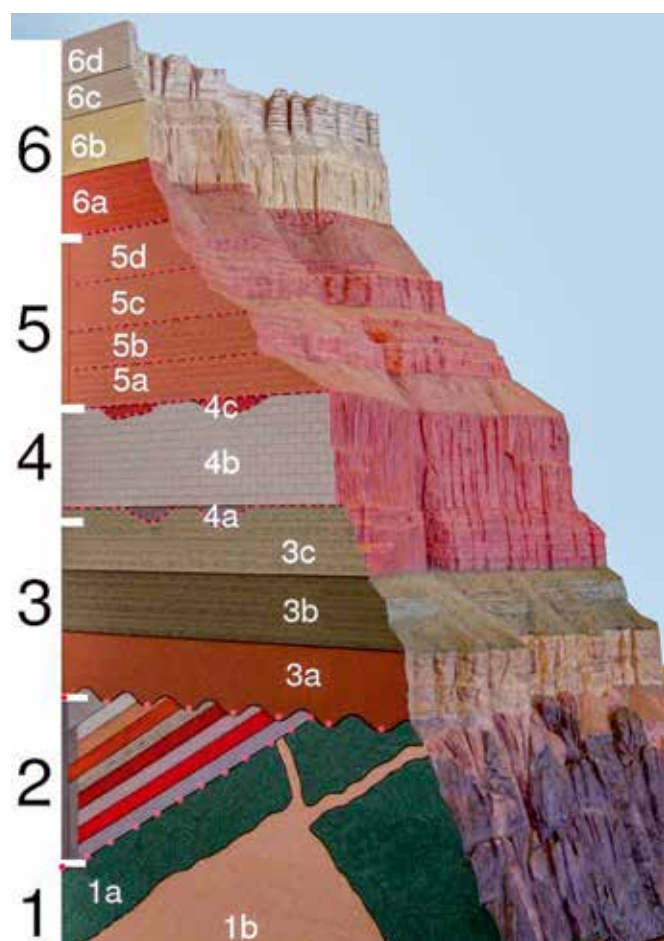
Afb. 5. Paleogeografische reconstructie van Laurentia tijdens het Midden-Devoon, 400 Ma geleden. Dit was de situatie na de botsing met Baltica (rechtsboven) en andere latere West-Europese landmassa's (rechts-midden); de jonge plooigordels van de Caledoniden en de Appalachen zijn goed zichtbaar. De rode stip geeft de ligging van het Colorado Plateau aan. Kaart door Ron Blakey, website Global and Regional Paleogeography, Northern Arizona University.

Tijdens het Vroeg-Carboon zorgt een uitgestrekte, ondiepe zee voor kalksedimentatie op grote schaal. Dat komt aardig overeen met de Onder-Carbonische kalksedimentatie in onze omgeving, bekend van de Ardennen. Later in het Carboon (Pennsylvanian) worden er juist meer continentale zandstenen afgezet. Dat is de tijd van vergletsjering van zuidelijk Gondwanaland. Langzamerhand worden dan ook de contouren van het grote continent Pangea zichtbaar (afb. 6).

In het CP-gebied begint er wat te veranderen. De westrand van het voormalige Laurentia wordt langzamerhand een actieve plaatgrens, met de subducerende Farallon Plaat. Er ontstaat meer reliëf door het opkomen van kleine bergketens. Inmiddels is het Perm angebroken en komt de regio in de Sahel-zone. Puinwaaiers en zand worden in het front van de nieuwe reliëfs afgezet. Woestijnen krijgen de ruimte. Hetzelfde gebeurt op dat moment in West-Europa. De zee laat zich echter nog niet helemaal verjagen. Terwijl aan de oostkant van het CP landafzettingen gevormd worden, keert de zee terug aan de westkant



Afb. 6. Paleogeografische reconstructie van de Noord-Amerikaanse landmassa, links, als onderdeel van het nu ontstane Pangea supercontinent, ten tijde van de overgang Carboon-Perm, 300 Ma geleden. Een deel van het Afrikaanse blok is rechtsonder zichtbaar. De rode stip geeft de ligging van het Colorado Plateau aan, waar ondiep mariene invloed zich doet gelden. Kaart door Ron Blakey, website Global and Regional Paleogeography, Northern Arizona University.



Afb. 7. Lithostratigrafische indeling van de Grand Canyon-opeenvolging in zes formatiegroepen, in tijd variërend van Precambrium - Perm. De met rood gestippelde formatiegrenzen geven aanzienlijke hiaten in tijd aan. De namen van de formaties worden in de tekst gegeven.

en sluit de Paleozoïsche serie van de Grand Canyon juist af met een flink kalkpakket. Dat zijn de kalken die de bovenkant van het Kaibab Plateau vormen en waarop bezoekers zich vergapen aan het uitzicht.

Op weg naar de Grand Canyon

Stratigrafen willen het onderzoeken van een gelaagd gesteente-pakket graag met het lezen van de bladzijden van het dagboek van Moeder Aarde vergelijken. Lagen als mooi op elkaar gestapelde documenten die per laag, als kleinste stratigrafische eenheid, hun gegevens bijdragen aan de kennis over de aardgeschiedenis. Die vergelijking gaat echter lang niet altijd op. Stel, je koopt een boek waarin nogal wat bladzijden door een inbindfout ontbreken. Het lijkt een mooi boek, maar het blijkt onverkooptbaar door de aanwezige hiaten en de koper krijgt zijn geld terug. De Grand Canyon is als zo'n incompleet boek waar het de aardgeschiedenis betreft. Zonder enige twijfel is het de grootste ontsluiting ter wereld, met gesteenten die van Precambrium tot het eind van het Paleozoïcum reiken (afb. 7). Daarvan liggen de Paleozoïsche formaties weliswaar keurig op elkaar. Toen in de loop der jaren de ouderdommen van deze gesteente-eenheden goed bekend raakten, mede doordat de numerieke tijdschaal nauwkeuriger werd, bleek dat deze keurige stapel Paleozoïcum eigenlijk vol zit met forse tijdshiatiën. De rode stippellijnen in afb. 7 geven aan waar de belangrijkste tijdshiatiën zitten. Feitelijk zit er meer tijd in de hiatiën dan in het gesteente. Kortom, het historische verhaal is behoorlijk onvolledig, zoals we in het volgende hoofdstuk zullen zien.

Hoe zit dat eigenlijk met grote tijdshiatiën bij onderling parallelle en niet-tektonisch gestoorde lagen? Hiaatvorming hangt primair af van de relatie tussen bodemdaling, sedimentaanvoer en zeespiegelbewegingen. In een ondiep zeegebied dicht bij het achterland is er niet veel verandering in bodemdaling of zeespiegelstijging voor nodig om de kustlijn een eind zeewaarts, of juist landwaarts te verplaatsen. In Nederland weten we daar alles van. Een stijgende zeespiegel, als voorbeeld, maakt mariene sedimentatie mogelijk op een gebied dat daarvoor bijvoorbeeld een kustvlakte was. Bij een geleidelijke bodemdaling kan zich zo een flink marien pakket ontwikkelen. Maar zet zich daarna een nog veel sterkere dalende zeespiegelontwikkeling in - denk aan een ijstijd - dan kan dat sediment door erosie weer verdwijnen en houden we een hiaat over zodra boven dit erosievlak opnieuw sediment wordt afgezet. Over de principes en achtergronden van hiaatvorming zijn dikke boeken geschreven; deze problematiek laten we hier verder liggen.

Als je eenmaal bij de canyon aankomt (meestal bij de zuidelijke rand) kun je niet in een enkele blik de hele gesteenteopvolging zien. Het is handig om zowel de westelijke als de oostelijke toeristenwegen te volgen en steeds een ander uitzichtpunt te nemen; met de bijgaande beschrijvingen erbij moet je de diverse formaties wel kunnen herkennen. De reisinformatie laat ik overigens graag aan de mooie folder over die je steeds overhandigd krijgt bij elk National Park dat je bezoekt. Wie de tijd heeft om een eind in de canyon af te dalen, bijvoorbeeld via het Bright Angel pad, zal daarvan zowel genieten als flink afzien bij het teruglopen naar boven.

Stratigrafische opbouw van de Grand Canyon

De canyongesteenten zijn formeel in zes formatiegroepen ingedeeld (afb. 7). Groepen 1 en 2 omvatten de kristallijne gesteenten die tot de oeroude kern van het Amerikaanse continent horen. Het zijn gneisen en schisten met daarin geïntrodeerde granieten, met ouderdommen tussen 1,8 en 1,6 Ga. (1 Ga is een giga-annum, oftewel een miljard jaar) Groep 2 vertegenwoordigt Precambrische sedimenten (Unkar en Chuar Groups, met negen formaties). Deze kwamen pas tot afzetting nadat de kristallijne ondergrond een lange geschiedenis achter zich had van bergtegevorming, eindigend met sterke afplatting van het gebergte. Deze formaties hebben een nogal uiteenlopende samenstelling, met stromatolitische kalken, maar vooral fluviatiele tot en met ondiep mariene schalies en zandstenen met overwe-



Afb. 8. De hoekdiscordantie ('The Great Unconformity') tussen de Precambrische sedimenten van Formatiegroep 2 en de Cambrische Tapeats Formatie (pakket 3.1 in afb. 7). In deze telefoto, genomen ter hoogte van Lipan Point, aan de oostkant van de South Rim Drive, is de Colorado Rivier goed zichtbaar. Het hoogteverschil tussen standpunt en rivier is hier ruim 1400 m. De Precambrische lagen maken een hoek van ongeveer 15° met de Tapeats Formatie. De Tapeats Fm. is duidelijk zichtbaar als een dikke beschaduwde steile wand. Je kunt goed zien dat het discordantievlak naar rechts steeds jongere Precambrische lagen afsnijdt.

gend grijze en roze tinten. Aan de oostelijke kant van de canyon kun je deze grijze en rode pakketten met witte tussenlagen goed zien liggen, zeker met een verrekijker (afb. 8). Deze eenheden zijn alleen in bepaalde breukschollen aanwezig, waarin ze ongeveer 15° zijn gekanteld ten opzichte van de nog steeds vrijwel horizontaal liggende Paleozoïsche opeenvolging daarboven. Waar deze oeroude sedimenten niet aanwezig zijn, zoals verder westelijk in de canyon, scheidt een tijdshiaat van bijna een half miljard jaar de kristallijne ondergrond van het oudste Paleozoïcum (afb. 9).



Afb. 9. Uitzicht vanaf de Westrim Drive ter hoogte van Hopi Point, met grijze Kaibab-kalk (met vuursteenconcreties) op de voorgrond en de zogenaamde Isis Temple, op de achtergrond rechts. Het uiterste topje van dit markante erosierestant bestaat uit de Coconino Sandstone. Diep in de canyon, onderin rechts, zijn de Precambrische, donkere schisten en gneisen te zien, hier opnieuw in contact met de Cambrische Tapeats Formatie (steilwand beneden rechts). Het contact is hier een nonconformiteit vanwege de overgang van ongelaaagd kristallijn gesteente naar een sediment. Dit contact beslaat een tijdsperiode van meer dan een miljard jaar.

Het hoekdiscordante contact tussen de Precambrische en Paleozoïsche gesteenten staat bekend als 'The Great Unconformity', een naam die de eerste onderzoeker John Wesley Powell al gebruikte. Powell en zijn mannen zijn beroemd geworden door hun uiterst riskante verkenning in 1869 van het toen nog onbekende verloop van de Colorado Rivier, met speciaal voor dat doel gebouwde houten roeiboten. Die zware reis is verfilmd

en hele hordes vakantiegangers zakken tegenwoordig in moderne wildwatervlotten de, inmiddels door waterkrachtcentrales getemde, rivier af. Tijdens onze reis deed een dame van tachtig enthousiast verslag van haar wildwateravontuur.

Formatiegroep 3, de Tonto Group, bundelt een drietal Midden-Cambrische formaties. De onderste **Tapeats Formatie** (3.1, afb. 7 en 9) is opgebouwd uit kustnabij afgezette zanden en conglomeraat. In de morfologie is het een steil verwerende eenheid tussen de Great Unconformity en de daarboven liggende **Bright Angel Shale** (3.2, afb. 7 en 9). De grijze schalies van deze eenheid vormen een opvallende bredere, minder steil oplopende zone. Het zijn fossielhoudende, mariene schalies met o.a. trilobieten en brachiopoden. De groep eindigt met de **Muav Limestone** (3.3, afb. 7 en 9). Deze vaak dolomitische kalken, met grijsbruine tot oranje- en roodbruine kleuren vormen weer steile richels. Deze formaties samen hebben een ouderdom van 525-505 Ma. Formatie 4a (afb. 7), de **Temple Butte Formatie**, is maar een bescheiden eenheid, overgebleven in uitgeschoorde depressies ('paleovalleien') in de Muav Limestone en gedateerd op 385 Ma. Het gaat om vaak roodpaarse zandige dolomieten. Het erosieve contact met de Muav Formatie. markeert dus een enorm hiaat van 120 Ma. Een sprong van Midden-Cambrium naar Midden-Devoon (Givetien). In West-Europa zit daar de Caledonische gebergtevorming tussen. Hier gebeurde er amper iets op tektonisch gebied. Opnieuw volgt er een erosieve fase, die veel van de Muav Formatie zal hebben verwijderd. Pas een 45 Ma later komt het tot afzetting van de **Redwall Limestone Formatie** (4b, afb. 9). De erosieve basis is vaak conglomeraat en bevat fragmenten van de beide onderliggende formatie(s). Het merendeel bestaat echter uit mariene, grijze kalken, soms vuursteen houdend of dolomitisch. De formatie bereikt een aanzienlijke dikte, tussen 150-240 m en vanwege de hardheid vormt deze goed zichtbare steile wanden. De ouderdom, Midden-Mississippian (~340 Ma), komt overeen met het Viséen, een etage die ook in onze ondergrond ondiep mariene kalken bevat, die pas aan de dag treden als je langs Visé rijdt. De top van de Redwall gaat opnieuw niet geleidelijk over in de volgende formatie. Uitgebreide karstverwerking en de vorming van geulsystemen wijzen op emersie en erosie aan het landoppervlak. In de geulsystemen bevinden zich restafzettingen van de **Surprise Canyon Formatie** (4c, afb. 7), die na afzetting ook weer grotendeels is opgeruimd. De formatie is niet of nauwelijks marien, lijkt hooguit estuarien geweest te zijn en bevat plantenresten in vaak paarsige silten. Als restant heeft het een discontinue verspreiding en qua ouderdom valt dit pakket rond de overgang Mississippian-Pennsylvanian (Vroeg-Laat Carboon; 325-316 Ma). De Supai Groep (groep 5, afb. 7) dekt grote delen van het Pennsylvanian af en reikt tot in het vroege Perm (318 – 287 Ma). De vier formaties die worden onderscheiden (**Watahomigi, Manakacha, Wescogame en Esplanade Formaties**) zijn elk weer met een tijdshiaat van meerdere miljoenen jaren van elkaar gescheiden. Ook nu heeft dat te maken met (relatief) dalende en stijgende zeespiegels. Als geheel vertoont de groep een opvallend rode kleur (afb. 9). Twee formaties worden gedomineerd door zandsteen, de andere twee zijn schalierijker. De Perm-formaties die groep 6 vormen zijn nu eens niet gescheiden door duidelijke erosievlakken die flinke hiaten in de tijd voorstellen. Hun ouderdom ligt tussen 286-270 Ma. De oudste **Hermit Formatie** (6a, afb. 7 en 10) is een pakket dat overwegend uit roodbruine silten en mudstones bestaat en daarom hellingen vormt. Vooral naar de top zijn ook kalkige zandsteenlagen ingeschakeld. De formatie heeft zich geulvormig ingesneden in de onderliggende Esplanade Formatie. Daarin komen af en toe plantenfossielen voor. De formatiedikte is in het westelijke deel aanzienlijk meer (~250 m) dan in het oostelijke deel (~30 m). De overgang naar de **Coconino Sandstone** (6b, afb. 7 en 10) betekent ook een overgang naar eolische afzettingen. De formatie toont grootschalige scheve gelaagdheid van goed gesorteerde zanden met een lichte tot bijna witte kleur. De formatiedikte loopt nogal uiteen, van enkele tientallen meters tot ca. 200 m in het middendeel van de canyon. De formatie vormt steile wanden (afb. 10). Deze formatie heeft een ruime verspreiding over het

Colorado Plateau en dagzoomt o.a. in de Zion-, Canyonlands- en Capitol Reef-parken.

De volgende zachtere eenheid, en dus weer hellingvormend, is de **Toroweap Formatie** (6c, afb. 7). Het pakket is opgebouwd uit afwisselend zandsteen, schalie en gips en is in ondiepe, kustnabije milieus afgezet. De formatie kan je vanwege donkerder kleuren goed onderscheiden van de Coconino-zandstenen eronder en de Kaibab-kalken erboven. De formatie heeft een Midden-Perm ouderdom.

Met het bereiken van de **Kaibab Limestone** (6d, afb. 7) zijn we aangekomen bij de hoogste stratigrafische eenheid van de canyon. De formatie is opgebouwd uit grijze, fossielrijke, zandige kalken met daarin de nodige fossielen van o.a. crinoiden, conodonten, koralen, brachiopoden en fusulinen. Een deel van de kalken is omgezet in dolomiet en er zijn ook vuursteen-niveaus. Aan de top kunnen ook schalieniveaus en gipslagen voorkomen. De dikte is in de orde van 100 m. De formatie is genoemd naar het Kaibab-plateau waar de Grand Canyon is ingesneden, maar heeft een veel grotere verspreiding. Boven de Kaibab-kalken volgt, met een flink tijdshiaat, de violette **Moenkopi Formatie** (Trias).



Afb. 10. Gezicht op een aantal markante Permformaties tijdens de afdaling over het Kaibab pad. Het meest opvallend is de grijze Coconino Sandstone, een eolische afzetting, gekenmerkt door grootschalige scheve gelaagdheid. De begroeide helling daaronder is de Vroeg Perm Hermit Fm., terwijl de rode afzettingen daaronder tot de Supai Groep behoren (Boven-Carboon – Onder-Perm). Boven de Coconino-zandsteen volgt allereerst de meer hellingvormende Toroweap Formatie, waarna de kalken van de Kaibab Formatie volgen, waarvan het bovenste deel de plateaurand vormt. De dikte van de hier ontsloten pakketten is ca. 400 m.

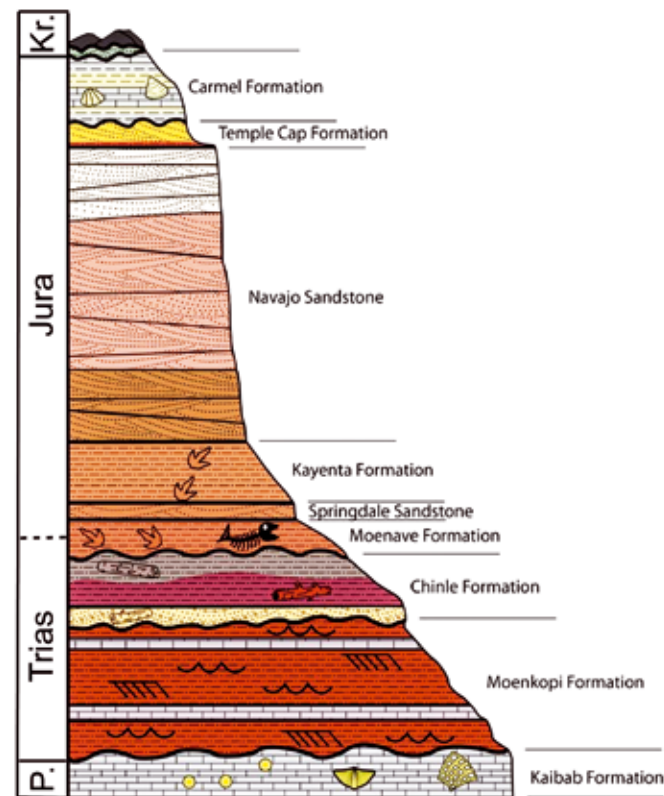
Grand Canyon en lavadammen

Rijgend langs de uitzichtspunten in het park zal je geen vulkanische gesteenten te zien krijgen. Maar verder westelijk, ca. 140 km van het bezoekerscentrum in Grand Canyon Village zijn er in het canyongebied eruptiepunten van Pleistocene vulkanen. Ze vormen samen het Uinkaret vulkanisch veld. Meer dan 150 uitvloei-fasen zijn geteld en radiometrisch gedateerd tussen 0,8 en 0,7 ka (Crow et al., 2015). Het bijzondere is dat de lava soms in het rivierdal zelf uitstroomde, zoals bij Vulcan's Throne (afb. 11), een nog jonge slakkenvulkaan, gedateerd op 72±4 ka (kilojaar, of 1000 jaar), terwijl de lava van de voet is gedateerd op 218±28 ka. Nader onderzoek heeft uitgewezen dat er 17 vulkanische dammen zijn geweest. De meeste werden gevormd tussen 850 en 400 ka, terwijl de jongste set tussen 200 – 100 ka uitstroomde vanuit de noordrand van de rivier (afb. 11). De jongste uitbarsting (Prospect Cone aan de zuidkant van de rivier, afb. 11 rechtsonder) is gedateerd op 38±3 ka. Als afdamming plaats vindt zal de rivier stroomopwaarts verbreden en al spoedig een soort stuwwaard vormen. Er is vastgesteld dat deze dammen na hun vorming tussen de 60 en 600 m hoog



Afb. 11. Google Earth-opname van het vulkanisme (de zwarte vlekken) rond Vulcan's Throne. Het groengrijze lint is de Colorado Rivier. Vulcan's Throne, rechtsboven, is rond 70.000 jaar geleden uitgebarsten op een plateau gevormd door de Supai Groep. De uitstromende lava bereikte de 1000 m lager gelegen rivier en damde deze vrijwel volledig af. Hetzelfde gebeurde ook op andere plaatsen (zoals in het midden van de foto). Het grote, bijna N-Z verlopende zijdalstelsel, dat bij Vulcan's Throne de Colorado Rivier snijdt, is de Toroweap-breuk. Het kleine vulkaantje bijna rechtsonder op de foto wordt doorsneden door een subrecent breukvlak.

zijn geweest. Een hoge lavadam zou een stuwwaer met een inhoud van tenminste de beide huidige grote stuwwaeren in de Colorado Rivier samen, Lake Mead en Lake Powell, gevormd kunnen hebben. Van deze meren zijn sedimentresten achter gebleven, zodat minimale waterhoogtemeting mogelijk is. Trouwens, als lava het dal instroomt en een terras aan de overkant weet te bereiken heb je ook een duidelijk gegeven over damhoogte. Zoiets lijkt te zien op de rechterkant van afb. 11. Eerdere onderzoekers (zoals Dalrymple en Hamblin in 1998) concludeerden dat de Colorado Rivier zeer efficiënt was in het opruimen van obstakels: in de loop van 10.000-20.000 jaar werden de



Afb. 12. Schematische stratigrafische kolom van de formaties die in Zion NP ontsloten zijn. Deze kolom is een bewerking van de kolom door parkgeoloog David Tarailo (zie de publieke parkwebsite: www.nps.gov/zion/learn/nature/rock-layers.htm).

dammen tenietgedaan. Maar Crow et al., 2015 nuanceren dat beeld. Zij maken onderscheid tussen stabiele en instabiele dammen, waarbij de stabiele het vele duizenden jaren volgehouden kunnen hebben. Een bezwijkende dam veroorzaakte catastrofale overstromingen.

Ook op de naburige Painted Desert zijn eruptiepunten aanwezig. Er zijn er ruim 600 geteld. De eerste erupties begonnen verder west rond 6 Ma geleden. De jongste eruptie, de nu bekende Sunset Crater bij Flagstaff begon in het jaar 1064 en verjoeg de daar wonende indianen. Het optredend vulkanisme is gerelateerd aan subductie van de Farallon Plaat.

Het Mesozoïcum van Zion NP

De zogenaamde Chocolate Cliffs omvatten als onderste trap van de Grand Staircase de Trias formaties. Zowel in West-Europa als in de Chocolate Cliffs is de oudere Trias overwegend continentaal en veelkleurig. In Europa volgen daarna ook ondiep mariene invloeden ('Muschelkalk'), maar niet op het CP. Bonte Triasafzettingen zijn in heel wat parken ontsloten, maar zoals afb. 2 aangeeft, kunnen we veel van de Mesozoïsche opeenvolging te zien krijgen in het noordelijker gelegen Zion National Park (NP) (afb. 1 en 12). Dus daar beginnen we mee.

Eigenlijk bestaat Zion uit twee apart te bezoeken delen, te weten het noordwestelijke deel met de Kolob Canyon en het bekendere zuidelijke deel langs de Virgin River. Voor de oudere eenheden moeten we naar Kolob Canyon. Als je er via Interstate 15 vanuit St. George naar toe rijdt, passeer je langs de weg de grijs verwerende Kaibab-kalken, die ook het Kaibab Plateau vormen.



Afb. 13. De Moenkopi Formatie, zoals ontsloten langs State Route 9 bij Virgin. De formatie is hier tot 300 m dik. De zandsteen aan de top van het plateau vormt de basis van de Chinle Formatie. De op de achtergrond uit de nevel oprijzende punten behoren tot de Navajo-zandsteen in het park.

Dat sluit dus mooi aan op de Grand Canyon-stratigrafie. Een erosiediscordantie scheidt deze tot 270 Ma oude Perm-kalken van de Vroeg- tot Midden Trias **Moenkopi Formatie** (250-240 Ma; afb. 12 en 13). Het is dan ook een scherpe overgang van open mariene kalken naar een semi-aride continentaal milieu, dat wordt gekenmerkt door afwisselend roodbruine, kleirijke silt en zandsteenlagen. De lagen zijn afgezet op grootschalige riviervlaktes met meanderende geulen en fijne sedimenten daarbuiten. Soms ontstonden er dunne gipslaagjes in ingedampte meertjes. De bovenkanten van de zandlagen kunnen door golfwerking en/of stroming geribbeld zijn. Ook zijn pootafdrukken van sauriërs gevonden, waaronder die van het beroemde 'handdier' *Chirotherium* (zie Gea, dec. 2006). Dit reptiel, waarvan alleen de pootafdrukken bekend zijn, is ook bekend uit de Trias Bontzandsteen van Europa en voor het eerst beschreven in Duitsland. Dat de spoorfossielen nu op meerdere continenten te vinden zijn, is allemaal heel logisch als je bedenkt dat de

gebieden toen onderdeel waren van één en hetzelfde continent Pangea. Afbeelding 13 toont de Moenkopi Formatie (voorgond), zoals je die tegenkomt nog vóór de westelijke ingang van het park met daarboven de Chinle Formatie.

De tweede Trias-eenheid, de Chinle Formatie (225-210 Ma) begint met lichtgekleurde grindhoudende zandsteen en conglomeraat als onderdeel van vlechtende rivierafzettingen. De basis is opnieuw erosief en tevens een tijdshiaat. Vervolgens treden rode en grijze kleirijke afzettingen op, die verder naar het oosten, zoals in Capitol Reef en vooral het Petrified Forest, veel mooier ontsloten zijn. Ook in deze Zion-afzettingen wordt verkiezeld hout gevonden, van dezelfde soort (*Araucarioxylon*) als in het Petrified Forest, maar dan wel in veel geringere hoeveelheden. Deze klei- en siltrijke afzettingen zijn afgezet op grote riviervlaktes. Veel klei is bentonitisch. Bentoniet is een verweringsresidu van vulkanische as. Bentoniet werd door de rivieren aangevoerd vanuit het achterland in westen en zuiden waar vulkanisme plaatsvond. Zulke klei is door het opzwelend vermogen bij nat worden en weer krimpen bij indrogen weinig aantrekkelijk voor plantengroei. De formatie is dus deels schaars begroeid.

De Moenave Formatie (afb. 12) overlapt volgens de nieuwste inzichten de Trias-Jura-grens. De basis van de formatie is opnieuw een erosievlak en het tijdshiaat met de Chinle Formatie schat men op ca. 10 Ma. De formatie bestaat uit afwisselend zandsteen, kleien en silten, met bruinrode kleuren en goed ontsloten in Kolob Canyon. De formatie is overwegend fluviatiel, met zowel lacustriene als eolische inschakelingen. Pootafdrukken van dinosauriërs komen voor en in de lacustriene lagen zijn visafdrukken gevonden. Grote aantallen dinosporen uit deze formatie zijn in 2000 gevonden aan de oostelijke rand van St. George, de stad net ten zuiden van Zion NP. Inmiddels zijn deze onderzocht, beschreven en gedateerd (Hettangien, 200 Ma) en er is een museumhal verrezen boven de ontsluiting (zie de

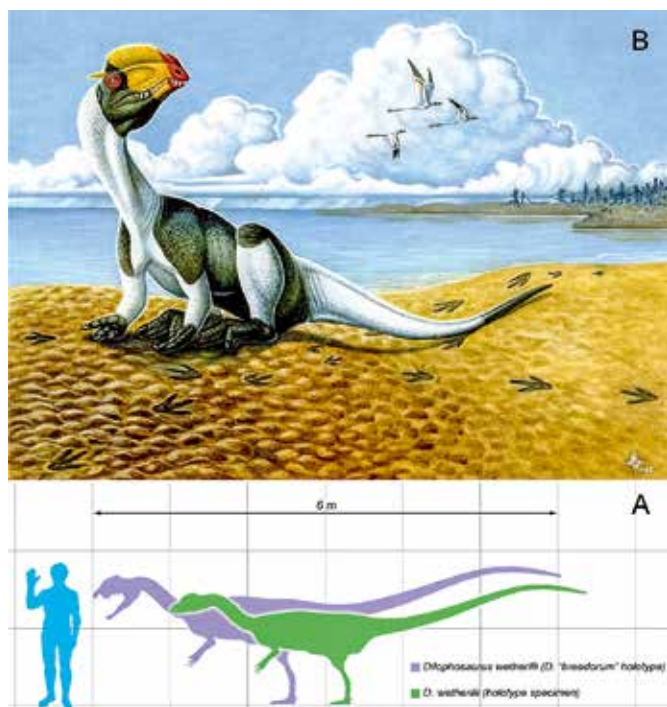
website van Johnson Farm). Het gaat om pootafdrukken van de ichnogenera *Eubrontes* en *Grallator*. (Een ichnogenus is een formele zoölogische naam voor een fossiele afdruk van een loop- of kruipspoor, zonder dat het werkelijke dier bekend is) De dino's liepen in groepen rond langs de zandige en modderige oever van een meer. De dinosporen bevinden zich dus op het terrein van een boerderij, maar door het belang van de site is een en ander met goede begeleiding vanuit de wetenschap veilig gesteld. Een bijzonder aspect van deze locatie is dat er ook hurkafdrukken voorkomen, die kennelijk werden gevormd als de beesten zich door hun poten lieten zakken om uit te rusten. Dat is een vogelachtige manier van doen en samen met bepaalde pootvormen was deze veronderstelde zithouding aanleiding om ze af te beelden als getoond in afb. 14. Vanwege de gelijkenis van de bijbehorende pootafdrukken met die in de iets jongere Kayenta Formatie is de daaruit bekende soort *Dilophosaurus* (zie apart kader en afb. 14) gebruikt als soort om deze rusthouding af te beelden.

De op de Moenave Fm. volgende **Kayenta Formatie** begint met een erosief contact, met daarboven fluviatiele afzettingen (Springdale Sandstone). Deze dik gelaagde rossige Jura-zandstenen vormen een steile boven de zachtere Moenave zandstenen, waardoor ze in het park vaak ondergraven worden en afstortingen veroorzaken, met af en toe schade aan wegen en gebouwen tot gevolg. De rest van de opnieuw minder erosieresistente formatie verschilt qua afzettingssmilieus en kleuren weinig van de Moenave Formatie. Dat geldt ook voor het voorkomen van dinosporen. Omdat deze formatie naar de top overgaat in het indrukwekkende pakket Navajo-zandsteen is het onderscheid met de Moenave wel te maken. De overgang naar de Navajo Sandstone Formatie is tamelijk geleidelijk, waarbij de grenslaag wordt gevormd door een witte laag (afb. 15).

Meer dinosporen

De bekendste dinosporen van de Kayenta Formatie komen niet uit het Zion-park, maar liggen ca. 200 km naar het zuidoosten bij Tuba City, op het grondgebied van Navajo-indianen. Op onze eerste reis namen we in onze camper een liftende Navajo-indiaan mee. Hij had autopech en wilde naar zijn broer, die, naar hij zei, bijna om de hoek woonde. Dus verlegden we even onze koers voor hem. Dat bleken minstens een mijl of 20 te zijn, maar onder het rijden kregen we wel de tip dat er vlakbij de woonplaats van zijn broer dinosporen te zien zijn. Wij dus daarop af! Die locatie is al eeuwenlang bij de Navajo's bekend onder de naam "plek van de grote hagedissensporen". Je kunt er parkeren en - als je een fooi geeft - rondwandelen over de fluviatiele roodbruine siltsteen en zoeken naar een fotogenieke afdruk (afb. 16).

De indiaanse landeigenaren zijn nog altijd beledigd over het feit dat in 1942 paleontologen uit Berkeley (Universiteit van Californië) er vlakbij skeletmateriaal opgroeven dat door Navajo's was ontdekt en dit ook meenamen. Dat goede materiaal is vervolgens geconserveerd en geprepareerd. Het bleek uiteindelijk om een theropode (carnivore sauriër) te gaan met een dubbele schedelkam. Het beest is vanwege die kam bekend geworden onder de naam *Dilophosaurus wetherilli* (afb. 14). Het was een slanke rover, een meter of twee hoog en 6 m lang en beroemd geworden sinds zijn angstaanjagende optreden in de film Jurassic Park. De ouderdom van dit fossiel is naar schatting 190 Ma. De onderzoekers van de oudere dinosporen uit St. George hebben deze soort gebruikt om te laten zien hoe zij denken dat de beesten in rustpositie zaten; lekker rustig langs de rand van het meer waar ze zich ophielden.



Afb. 14. Twee afbeeldingen van *Dilophosaurus wetherilli*, een dino met twee beenkammen op de schedel. Afb. A geeft een reconstructie van de loophouding en hoogte in vergelijking met een mens. Door M. Martinyuk, naar een skeletdiagram door V. Sinkkonen via Wikimedia Commons CC-BY-3.0.

B. Reconstructie door Milner et al. (2009) van de theropode *Dilophosaurus wetherilli* in een rusthouding die op die van vogels lijkt; een reconstructie op de rustsporen in de dinosporenrijke afzetting van St. George. Tekening: Heather Kyoht Luterman via Wikimedia Commons CC-BY-2.5.

De **Navajo Sandstone** (Vroeg Jura, 191-174 Ma) maakt in morfologisch opzicht deel uit van de Vermilion en White Cliffs (afb. 2). Deze woestijnafzettingen zijn schitterend ontsloten langs de Virgin River. Maar ook andere nationale parken, zoals Dinosaur,



Afb. 15. Overgang van de Kayenta Formatie naar de Navajo Sandstone in het noordwestelijke parkdeel van Zion NP (Kolob Canyon). Het verloop van de witte grenslaag is met lichtblauw aangegeven.

Canyonlands, Capitol Reef en Arches, hebben er voldoende van in de aanbieding. Rond Zion NP is de formatie echter het dikst, tot wel 670 m! Dat de Navajo-zandsteen in het westen van het CP dikker is dan in het oosten, heeft alles te maken met de tektonische situatie. Het hele gebied maakt dan al tijden deel uit van het zgn. Western Interior Basin, het rustige, achter de convergente plaatgrens met bijbehorende vulkanische boog, gelegen dalingsgebied. In de loop van de Jura begint Pangea uiteen te vallen door allereerst het uiteendrijven van Gondwana en het noordelijke Amerikaans-Aziatische deel van Pangea. Hierdoor neemt aan de Noord-Amerikaanse kant de gebergtevormende activiteit toe (de Sevier orogenese). Dit resulteert vervolgens in een snellere bodemdaling in het westelijke deel van het Colorado Plateau.



Afb. 16. Dinopootafdrukken in siltsteen van de Kayenta Formatie, zoals deze goed te zien zijn bij Tuba City en mogelijk toebehorend aan de theropode *Dilophosaurus*.

Sprekende kleuren

De gemiddelde toerist vergaapt zich in Zion NP meestal aan de prachtige verweringsvormen en kleuren van de Navajo-zandsteen en geniet van wandelingen of trektochten door en over de zandsteenruggen. De vaak oranje- en roodbruine kleuren worden gevormd door wisselende hoeveelheden en menging van ijzeroxiden en/of hydroxiden (limoniet, goethiet, hematiet), die in de loop der tijden via het grondwater in de poriënruimtes zijn neergeslagen.

Maar de witte kleur, die vooral in Zion het bovenste deel vormt, is juist een gevolg van ontkleuring door latere uitloging, als gevolg van reducerend grondwater met daarin koolwaterstoffen (afkomstig uit Krijt-afzettingen).

Naast de rijkdom aan kleuren valt ook de grootschalige scheve gelaagdheid van dit pakket op. De Navajo Sandstone is inderdaad representatief voor echte zandwoestijnafzettingen. De Navajo-tijd was er één van extreme droogte. De passaatwinden die er woeien, hadden hun vocht al verloren. Deze noordoostelijke en soms ook noordwestelijke passaatwinden vormden, net als in hedendaagse zandwoestijnen, enorme sikkelvormige duincomplexen. Tijdens de Vroege Jura lag de regio op ongeveer 10° noorderbreedte, dus iets dichterbij de evenaar dan de moderne zandwoestijnen. Duinvorming gebeurt zoals bekend door opwaaien, met name doordat de stuivende zandkorrels zich aan de lijzijde kunnen ophopen. Maar dat proces gaat met horten en stoten. Winden waaien niet altijd, de windrichting kan zich wijzigen, zandaanvoer kan stagneren, etc. Eenmaal gevormde duinen kunnen dan ook ten dele of volledig verwaaieën. Wat je netto als eindresultaat van een langdurig sedimentatieproces overhoudt, is een opeenstapeling van mega-scheefgelaagde 'sets', scheefgelaagde eenheden die onderling gescheiden worden door meestal subhorizontale erosievlakken. Deze ondervlakken stellen tijdschieten voor die ontstaan door latere afvlakking van het duin. Een schoolvoorbeeld van duin-scheve gelaagdheid is ontsloten langs de Zion-Mt. Carmel Highway dichtbij de oostgrens van het park (omgeving Checkerboard Mesa; afb. 17 en voor- en achterplaat). Op sommige laaggelegen plaatsen - en dat valt af te leiden uit lokale kalkige tussenlagen, hoger in de formatie - zijn ook oases aanwezig geweest.

Boven de Navajo-zandsteen is een pakket aanwezig met afwisselend eolische zandsteen en roze-rode kleirijke lagen, de Midden-Jura **Temple Cap Formatie** (afb. 18). Vanuit het noorden dringt geleidelijk een ondiepe binnenzee het indalende westelijke deel van het CP binnen. Er ontwikkelen zich modderige getijdenvlaktes, terwijl ook woestijnzanden ook hun invloed uitoefenen, vooral oostwaarts. Deze afzettingen steken door de zachtere tussenlagen duidelijk af tegen de vaak witte toppen van de Navajo Sandstone. Deze eenheid ligt steeds hoog en is lastig te bereiken. Wellicht is dat een reden dat er geen fossielen uit bekend zijn. Dat wordt anders in de **Carmel Formatie** als de binnenzee het CP bereikt. Er worden mergelige kalken, kalken en soms ook evaporitische gipslagen afgezet. Maar de woestijn is nooit ver weg en laat soms ook zijn sporen na. Bij meer open mariene condities worden crinoidenrijke kalken gevormd, maar er waren ook brakke milieus, met oesterbanken en gastropoden.

Helemaal op het topje van de Horse Ranch Mountain is nog een restje Krijt aanwezig. Het gaat om bruin gekleurde conglomeraten en zandstenen van de **Cedar Mountain Formatie** (afb.18). Deze Onder-Krijt afzettingen (~120 Ma) accumuleerden als alluviale puinwaaiers en riviervlaktes, met zijdelingse overgangen naar kustvlaktes. Deze klastische afzettingen volgen met een erosief contact op de onderliggende Midden-Jura Carmel Formatie. Het bijzondere is dat nu het afbraakmateriaal voor het eerst uit het westen komt; een gevolg van afbraak van het nieuw gevormde reliëf door de Sevier gebergtevorming.

Voor de afzettingen van Krijt en Paleogeen moeten we ons noordelijker verplaatsen, richting Bryce Canyon. Over dit park met zijn bijzondere landschapsvormen gaat deel 2 van dit artikel, gevolgd door bijzonderheden van diverse andere parken en landschappen.

Literatuur

- Blakey, R. C., 2014. Paleogeography and Paleotectonics of the Western Interior Seaway, Jurassic-Cretaceous of North America. Search and Discovery Article #30392.
- Biek, R.F., Willis, C. W., Hylland, M.D. and Doelling, H.H., 2000. Geologic Road Guides To Zion National Park, Utah. Geologic Road, Trail, and Lake Guides to Utah's Parks and Monuments,



Afb. 17. Grootchalige, door duinvorming ontstane scheve gelaagdheid in de Navajo Sandstone, ontsloten dicht bij de oostelijke uitgang van Zion NP. Foto gemaakt in noordelijke richting. De grootste scheefgelaagde sets, zoals halverwege de heuvel, zijn minstens 8 m hoog.

Utah Geological Association Publication 29: 1-89.

- Crow, R.S., Karlstrom, K.E., McIntosh, W., Peters, L., Crossley, L., and Eyster, A., 2015. A new model for Quaternary lava dams in Grand Canyon based on $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ dating, basalt geochemistry, and field mapping: *Geosphere*, v. 11, (5):. 1305–1342, doi:10.1130/GES01128.1.
- Dalrymple, G. B., & Hamblin, W. K. (1998). K-Ar ages of Pleistocene lava dams in the Grand Canyon in Arizona. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(17), 9744–9749.
- Davis, G.H., and Bump, A. P., 2009. Structural Geologic evolution of the Colorado plateau. In: Kay, S.M., Ramos, V.A., and Dickinson, W.R., eds., *Backbone of the Americas: Shallow Subduction, Plateau Uplift, and Ridge and Terrane Collision*: Geological society of America, Mem. 204: 99-124.

- Doelling, H.H., Blackett, R.E., Hamblin, A.H., Powell, J.D., Pollock, G.L., 2000. Geology of Grand Staircase-Escalante National Monument, Utah. Utah Geological Association, Publ. 28:1-43. In: D.A. Sprinkel, T.C. Chidsey, Jr., and P.B. Anderson, editors, *Geology of Utah's Parks and Monuments*.
- Flowers, R.M., 2010. The enigmatic rise of the Colorado Plateau. *Geology* 38 (7): 671-672.
- Kirkland, J. I. and Milner, A.R.C., 2006. The Moenave Formation at the St. George Dinosaur Discovery Site at Johnson Farm, St. George, southwestern Utah. In: Harris et al., eds., *The Triassic-Jurassic Terrestrial Transition*. New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin 37: 289-299.
- Mathis, A., and Bowman, C., 2007. The Grand Age of Rocks: The Numeric Ages for Rocks Exposed within Grand Canyon, Grand Canyon National Park, Arizona, National Park Service, Grand Canyon National Park, Arizona.
- Milner A. R. C., Harris J.D., Lockley M.G., Kirkland J. I. and Matthews N.A., 2009. Bird-Like Anatomy, Posture, and Behavior Revealed by an Early Jurassic Theropod Dinosaur Resting Trace. *PLoS ONE* 4(3): e4591. doi:10.1371/journal.pone.0004591.
- Milner, A.R.C. & Lockley, M. G. and Johnson, S.B., 2006. The story of the St. George Dinosaur Discovery Site at Johnson Farm: An important new Lower Jurassic dinosaur tracksite from the Moenave Formation of southwestern Utah. *New Mexico Museum of Natural History and Science Bulletin* 37: 329-345.

Alle foto's zijn van de auteur.



Afb. 18. Namiddagzonlicht na een regenbui belicht de Horse Ranch Mountain, zodat de jongste lagen die in Zion park dagzomen ineens goed zichtbaar worden. De rode zandsteenwand rechts en de steilwand op de achtergrond behoren tot de Navajo Sandstone. Boven de eerste rode stippellijn volgt de zachtere Temple Cap Formatie, gevolgd na de tweede stippellijn door de mariene kalken van de Carmel Formatie. Uiterst links op de foto (na de derde rode stippellijn) de bruine kleuren van het restant van de Cedar Mountain Formatie.