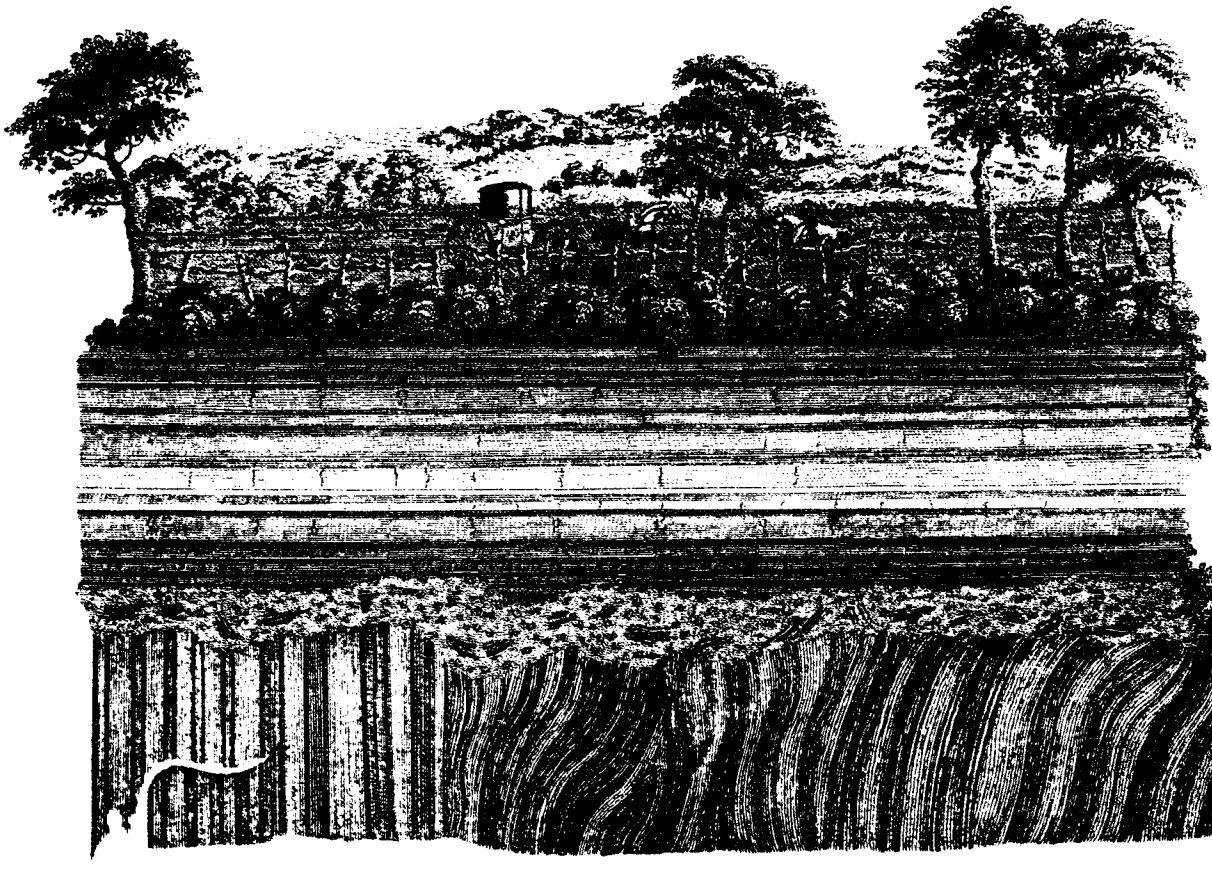
Stratigrafie

door drs. W.C.P. de Vries

De wetenschap van de stratigrafie omvat de beschrijving, onderverdeling en analyse van de lagen van sedimentaire gesteenten van de Aarde. De naam is afgeleid van het Latijnse woord *stratum* voor 'laag' en het Griekse *graph* voor 'beschrijven'. Hoewel vele richtingen van de aardwetenschappen naast een beschrijvend deel, de -grafie, een kennis-deel kennen, de -logie, bestaat er geen afzonderlijke stratologie.

De stratigrafie heeft vanaf de tijd van de wetenschappelijke revolutie van de 17de eeuw tot op de dag van vandaag een belangrijke bijdrage gegeven tot de kennis over de geschiedenis van de Aarde en over de zoektocht naar het voorkomen en de gebruiksmogelijkheden van de natuurlijke hulpbronnen.
Het vaststellen van de opeenvolging van lagen heeft belangrijk bijgedragen aan de erkenning dat de Aarde een lange en complexe ontwikkeling achter de rug heeft. In het begin van de 18de eeuw ondersteunt de biologie de geologie in het bepalen van een gedetailleerde chronologie met behulp van de fossielen, ofwel nauwkeuriger gezegd: 'de gefossiliseerde overblijfselen van het vroegere leven'. De noodzaak om de Industriële Revolutie van energie te voorzien leidde tot een grote productie van geologische kaarten en gesteentekolommen waaruit de regelmaat in de verspreiding van gesteenteformaties was af te leiden, waardoor de opsporing van grondstoffen gemakkelijker werd. In het begin van de 19de eeuw was het een ingenieur bij de kanaalaanleg in Engeland die de opeenvolging van lagen wist te combineren met de voorkomende fossielen waaraan de ontwikkeling van het leven kon worden afgeleid, en daarmede de mogelijkheid opende gesteenteformaties over grote gebieden te kunnen correleren tot zelfs over de oceanen heen. Vooral de zoektocht naar aardolievoorkomens heeft geleid tot de opstelling van zeer gedetailleerde biozones waarbij ook de snelheid van evolutionaire veranderingen kon worden afgeleid. In de loop van de 20ste eeuw werden de klassieke stratigrafische methoden, te weten de bepaling van de opeenvolging van gesteentelagen (superpositie) met hun verschillende biota en wereldwijde vergelijkingen en correlaties - die nog altijd niet meer dan relatieve dateringen geven - gecombineerd met vele nieuwe technieken, zoals onder meer radiometrische, absolute dateringen; gegevens van elektrische en magnetische eigenschappen van de gesteenten - die veelal verkregen worden uit boorgaten - ; de paleo-magnetische stratigrafie en een aantal geofysische methoden. Uit dit samengaan krijgt de geologie de mogelijkheden om ouderdommen te kunnen toekennen aan bepaalde geologische gebeurtenissen, kunnen opeenvolgingen van lagen en structuren van de diepere delen van de aardkorst worden ontrafeld en de stratigrafische gegevens worden ingepast in het belangrijkste dynamische proces van de Aarde: dat van de plaattektoniek.

Als de oudste beschouwingen die wel gerangschikt worden onder de ontwikkeling van de stratigrafie zijn die van Xenophanes, die in ca. 450 v.Chr. verklaarde dat schelpen die op grote hoogte in de bergen worden gevonden bewijzen dat eens, in het verre verleden, de zee het land overstroomde. Hoewel er in Griekse en Romeinse tijd geen wetenschap bestond die aandacht besteedde aan de Aarde komt men in de Klassieke geschiedenis opmerkingen tegen over waarnemingen en theoretische overpeinzingen over de Aarde. Zo beschrijft Aristoteles (384-322 v.Chr.) langzame veranderingen in de hoogte van de zeespiegel die aanleiding geven tot een terugtrekken en opkomen van de zee. Dit zou vergeleken kunnen worden met de tegenwoordig gebruikte termen regressie en transgressie, hoewel er nooit een verbinding gelegd is met de laat 18de eeuwse ideeën betreffende de aanwijzingen in de sedimentserie die wijzen op een transgressie. In de Middeleeuwen verschijnen er onder meer van Avicenna (980-1037) en Albertus Magnus (1206-1280) beschouwingen over de aard van fossielen, over de vorming van bergen en de in zee gevormde afzettingen. Dit zijn echter opmerkingen zonder samenhang, hetgeen gedurende lange tijd, in de Middeleeuwen en de Renaissance, typerend is geweest voor geologische waarnemingen. De enige, enigszins systematische ontwikkeling in de geologische kennis betrof de mijnbouw, onder meer door Agricola (1494-1555). Leonardo da Vinci (1452-1519), is de eerste geweest die resoluut weigerde om zich in enig keurslijf van eenvormigheid te passen, zijn observaties en ideeën over de organische oorsprong van fossielen en zijn weloverwogen bewijsvoering van de onmogelijkheid dat uit de zoete wateren van de Bijbelse Zondvloed de enorme hoeveelheden in zee gevormde afzettingen konden zijn gevormd, waren in brede zin van toepassing op de stratigrafie. Deze denkbeelden werden echter door tijdgenoten niet overgenomen en vormden geen kiemen voor het ontstaan en groei van een praktische stratigrafie.
Een enigszins samenhangende ontwikkeling van de stratigrafie begint niet eerder dan in de loop van de 17de eeuw, waarbij vooral René Descartes (1596-1650) van belang is. Hoewel Descartes nauwelijks feitelijke bijdragen heeft geleverd, drong hij aan op een rationele beschouwing van natuurlijke verschijnselen en introduceerde de historische echtheid in de beschouwing van de ontwikkeling van de Aarde; hij gaf daarmede de aanzet tot een geheel nieuwe kijk op de ontwikkeling van gesteenten.
Het was Nicolaus Steno (1638-1686) die in 1669 de basiswetten van de stratigrafie opstelde: 'lagen worden achtereenvolgens op elkaar afgezet met de jongste boven' - dit is de eerste stratigrafische wet, de 'wet van de superpositie' - en 'sedimentaire afzettingen worden horizontaal neergelegd'. Deze zo simpel lijkende regels vormden de grondslag voor de ontwikkeling van de stratigrafie. Uit deze regels kan worden afgeleid dat iedere andere oriëntatie en structuur van sedimentaire pakketten bewijzen waren voor de complexe dynamische processen van de Aarde.
Het einde van de 17de eeuw en het begin van de 18de zagen de grote invloed van de 'natuurlijke theologen' die als het hoogste goed beschouwden alle redelijkheid in alle opzichten dienstbaar te maken aan God. De jonge aardwetenschap diende de gegevens uit de gesteenten in te passen in de boodschap van de Heilige Schrift en vooral het boek Genesis. Een bekend man was John Woodward (1665-1728) die poogde om de verdeling van fossielen in sedimenten te rijmen met de door God geregelde opschorting van de wetten van de zwaartekracht tijdens de Zondvloed; tussen de regels door lezend blijkt echter wel dat Woodward problemen ondervond met de inpassing van waarnemingen uit de natuur met de ideeën die in die tijd opgang deden. Hij heeft wel een van de eerste systematische onderzoekingen uitgevoerd aan natuurlijke historie en suggereerde dat bepaalde sedimentaire lagen lateraal over grote afstanden konden worden vervolgd.
Een ander probleem was de verdeling en opeenvolging van lagen in de loop van de tijd. Het principe van de superpositie van Steno hield ook een aanwijzing in van de voortgang in de tijd, maar kon slechts zeer plaatselijk toegepast wor-



Afb. 1. De hoekdiscordantie bij Jedburgh. Verticale Silurische kwartsiet is discordant bedekt door Devonische zandsteen.

den. Robert Hooke (1635-1703) voorspelde dat het op een dag mogelijk zou zijn om een chronologie op te stellen met behulp van fossielen: 'getuigenissen van de Oudheid die de natuur heeft achtergelaten als monumenten en hiëroglyfen van de aardgeschiedenis'. Fossielen zouden dus op eenzelfde wijze aanwijzingen geven voor geologische tijd als munten de perioden van de verschillende Romeinse keizers aangeven. Het belang van deze claim werd echter ondermijnd door het ontbreken van gedetailleerde aanwijzingen voor het verbinden van bepaalde soorten fossielen met bepaalde gesteentelagen. Het zou nog een eeuw duren voordat de volledige mogelijkheden van fossielen als indicatoren van tijdspannen en hulpen voor correlatie tot ontplooiing zouden komen door het werk van William Smith, Georges Cuvier en Alexandre Brongniart. Een uitgebreid overzicht van de pogingen van vele verschillende wetenschappers om de betekenis van geologische tijd te kunnen doorzien wordt gegeven door Claude Albritton in zijn *The Abyss of Time* (1980) en door Stephen J. Gould in diens *Times Arrow, Times Cycle* van 1987.

De ontwikkeling van de stratigrafie begon langzaam in het begin van de 18de eeuw, er trad een vooruitgang op in de tweede helft van die eeuw en rond 1800 vond er de duidelijke versnelling plaats toen het principe van de biotische ontwikkeling op de lagen werd toegepast. Het waren in het begin van de 18de eeuw vooral de Franse naturalisten die, niet geïnteresseerd in de theoretische aanpak van de Britse natuur-theologen, verzamelingen aanlegden van fossielen en deze beschreven, en daaruit interessante conclusies trokken. In 1718 suggereerde Antoine de Jussieu (1686-1758) dat plantenafdrukken in oude gesteenten tropische soorten vertegenwoordigden. Twee jaar later betoogde Antoine de Réaumur (1683-1757) dat de fossiele schelpen in het gebied van Touraine de getuigenissen waren van vroegere invasies van de zee. In een commentaar op de publicatie van de Réaumur, suggereerde Bernard Le Bovier de Fontenelle (1657-1757) dat 'kaarten die gemaakt worden naar aanleiding van alle vormen van schelpen die in de aarde begraven zijn', eens duidelijk licht kunnen gaan werpen op vroegere aardse processen. In 1719 tekende John Strachey in Engeland een verticaal profiel waarbij hij fossielen, superpositie, structurele relaties en correlaties combineerde en waarin hij een breukzone kon aantonen waarlangs verplaatsing was opgetreden.

Naturalisten verzamelden informatie uit plaatselijke geologische secties waarmee een basis zou worden gelegd voor toekomstige regionale synthesen, maar in die tijd, de loop van de 18de eeuw, werden deze beschrijvingen niet geïntegreerd tot een grotere of wereldwijde visie op de aardgeschiedenis. Het was het werk van Johann Gottlob Lehmann (1713-1767), dat werd gepubliceerd in 1756, waarin hij de aandacht richtte op de ontwikkeling van de planeet Aarde als geheel door zijn voorstel van een fundamentele tweedeling in gesteentetypen, die een afspiegeling zou vormen van de aardgeschiedenis. Hij meende dat een complex van Primitieve kristallijne gesteenten, het *Gang-Gebirge,* de basis was waarop de gelaagde Secundaire afzettingen van het *Flötz-Gebirge* liggen. Vier jaar later stelde Giovanni Arduino (1714-1795) een verdeling op in Primaire- (pre-Zondvloed), Secundaire- (ten tijde van de Zondvloed) en Tertiaire gesteente-eenheden (na de Zondvloed). Deze benamingen worden heden nog altijd gebruikt, zij het in andere betekenissen. Hoewel deze indelingen veelomvattend waren in hun algemeenheid, werd de Aarde in deze schetsen beschouwd als een planeet met een uniforme geschiedenis, die overal op eenzelfde wijze gevolgd en begrepen kon worden. Deze beide onderzoekers combineerden veldwaarnemingen, vooral in gebergtegebieden, met een opeenvolging van gebeurtenissen zoals die vermeld zijn in de Heilige Schrift. Zij vormden daarmee een overgang tussen de onderzoekers van de late 17de eeuw die hun theorieën over de Aarde volledig baseerden op interpretaties uit de Bijbel en de onderzoekers uit het begin van de 19de eeuw die de ideeën van Bacon en Cuvier volgden om wetenschappelijke verklaringen te beperken tot empirische feiten zonder theoretische of theologische argumenten.

Terwijl Arduino en Lehmann figuren van het grote overzicht waren, bestudeerde Georg Christian Füchsel (1722-1773) de gesteenten van het Thüringer Woud en verdeelde deze in 'formaties': gesteenteseries die gekarakteriseerd waren door bepaalde lithologische overeenkomsten. Iedere formatie was ontstaan onder bepaalde omstandigheden en de afzetting van de gesteenten representeerde daarbij een bepaalde tijdspanne; deze tijdsperioden zouden niet overeen kunnen komen met die tijdens de Zondvloed.

Over Abraham Werner (1749-1817) wordt in de Engels sprekende wereld vaak neerbuigend gesproken wegens zijn Neptunistische overtuiging - in tegenstelling tot de ideeën van de Plutonisten waarvan Hutton de exponent was - waarbij ook gesteenten als bazalt uit het water van de universele oceaan zouden zijn neergeslagen. Werner besteedde wel veel aandacht aan de petrologische eigenschappen van gesteenten en vooral zijn ideeën over de opeenvolging van gebeurtenissen die vervat zijn in de laagvormige getuigenis van de aardgeschiedenis verdienen meer positieve aandacht.

Tijd is een doorlopend aandachtspunt bij de pogingen om de aardgeschiedenis te ontrafelen. Het geloof in de ouderdom van 6000 jaar, berekend aan de hand van Bijbelse gegevens, heeft vele schrijvers in de periode van 1650 tot 1850 (en zelfs tot op de dag van heden) genoodzaakt om bovennatuurlijke ingrepen aan te nemen om de enorme dikte aan sedimentaire gesteenten te kunnen verklaren, gevormd in zo'n korte tijdsperiode, die daarnaast soms ook nog imposante deformaties tonen.
De grote vraag is lange tijd geweest in hoeverre de gesteenten zelf de tijd konden aantonen. Jean-Louis Giraud, abt van Soulavie (1752-1813), stelde dat fossielen die voorkomen in sedimenten in zuidelijk Frankrijk als tijdsindicatoren konden dienen. In zijn boek over de natuurlijke historie van zuidelijk Frankrijk van 1780 merkte hij op dat de fossiele soorten in de hoogste lagen meer gelijkenissen vertoonden tot levende soorten dan de overblijfselen in oudere lagen. In een heel algemene wijze gebruikte Giraud het concept van de onderverdeling naar percentages van huidige organismen - zoals dat in latere tijd is gedaan voor het Tertiair, hetgeen algemeen is aanvaard voor deze periode - en verdeelde daarmede de aardgeschiedenis in vijf opeenvolgende tijdsperioden. Deze methode werd verfijnd door Gérard-Paul Deshayes (1799-1875) die met behulp van 40.000 soorten, ondergebracht in 8000 genera, een tijdsopeenvolging opstelde voor de - Tertiaire - sedimenten van het Bekken van Parijs. Charles Lyell (1797-1875), die de namen Plioceen, Mioceen en Eoceen heeft gegeven voor de onderverdeling van het Tertiair, gebruikte daarbij de methode en de gegevens van Deshayes.
Na de erkenning van de geldigheid van de superpositie en het vermogen van fossielen om lagen in hun tijdsvolgorde te plaatsen, bleef de praktische vraag hoe individuele lagen of formaties konden worden herkend en gecorreleerd over grotere afstanden, ook als er geen continue ontsluitingen aanwezig zijn. Het was een praktisch man die een belangrijke bijdrage gaf aan de oplossing: William 'Strata' Smith (1769-1839), een ingenieur bij de bouw van het netwerk van kanalen in Engeland, herkende het grote voorspellend vermogen van fossielen als sleutels voor bepaalde formaties. Het heeft hem veel moeite gekost om de benodigde kennis te verkrijgen, er moesten systematische collecties worden aangelegd, determinaties worden gedaan, verbindingen tussen biota en lithologie vastgesteld en standaard geologische opeenvolgingen opgesteld zodat de relatie tussen fossielen en afzettingen op 'universele' wijze kon worden opgesteld over grote gebieden. Hiermede was een empirische, op veldgegevens gebaseerde techniek geboren om verticale opeenvolgingen en horizontale verbreidingen aan te kunnen tonen. Hiermee kreeg de stratigrafie de technieken om voorspellingen te doen over de onder- en bovenliggende lagen van een op een bepaalde plaats ontsloten serie lagen en de eenheden te correleren over meerdere regio's.
Hoewel de secties en de geologische kaart die Smith maakte tot op de dag van vandaag hun waarde hebben behouden, presenteerde hij zijn bevindingen rond 1797 in een informele voordracht die nauwelijks bekendheid kreeg. De oorzaak was dat Smith in het klassenbewuste Engeland behoorde tot een lager sociaal milieu dan de academici en hij geen mogelijkheid had om zijn resultaten op de gebruikelijke wijze, in een vaktijdschrift, aan de geleerden bekend te maken. Het werk van Smith heeft uiteindelijk veel bekendheid gekregen, maar een vergelijkbaar probleem heeft lang gespeeld en doet het nog altijd: de kennis van groeve-arbeiders, mijnwerkers en amateurs bereikt vaak niet de professionele kringen.
In Frankrijk werd de analyse van het Bekken van Parijs uitgevoerd door de top-geleerden Georges Cuvier (1769-1832) en Alexandre Brongniart (1770-1847) die in hun publicatie in gerenommeerde vakbladen, begonnen in 1808, de waarde demonstreerden van fossielen als aanwijzingen voor de wijze van vorming van sedimenten en voor de ouderdom, op dezelfde wijze als Smith dat had gedaan. Daarnaast toonden zij aan dat het afzettingsmilieu ook afgeleid kon worden uit de fossielinhoud. Zij onderscheidden aan de hand van de fossielen mariene afzettingen van zoetwater-afzettingen en vestigden de aandacht op horizontale veranderingen en discontinuïeiten in de opeenvolging die veelal heel wat minder indrukwekkend waren dan de imposante hoekdiscordanties die door James Hutton (1726-1797) van Siccar Point en Jedburgh in Schotland waren beschreven. Afb. 1.
Het duurde niet lang voordat de volle kracht van de biotische opeenvolging en de toepassing in het terrein werd toegepast op oudere formaties dan die uit de Jura en Krijt (Smith) en het Tertiair van noord Frankrijk. Het opstellen van de geologische kolom van, voornamelijk de post-Precambrische, geschiedenis was het grote succes in de ontwikkeling naar een volwassen aardwetenschap in de jaren '30 en '40 van de 19de eeuw. Adam Sedgwick (1785-1873) stelde in 1838 de term Paleozoïcum voor en John Phillips (1800-1874) in 1840 de namen Mesozoïcum en Kaenozoïcum; alle namen gebaseerd op de ontwikkeling van het leven op Aarde.
Gezegd kan worden dat Sedgwick een van de belangrijkste figuren is rond het opstellen van de geologische kolom. Een heel belangrijke fase in die ontwikkeling was de vaststelling van de Cambrische, Silurische en Devonische systemen met als meest beroemde, klassieke controverse die van de begrenzing tussen Cambrium en Siluur met de oververhitte discussie tussen Sedgwick en zijn eens zo grote vriend, de aristocratische amateur Sir Roderick Murchison (1792-1871), bekend als *The Highlands Controversy*. In het boek van David Oldroyd (1990) met die titel wordt een meeslepend beeld geschetst van de ontrafeling van de enorm complexe stratigrafie en structuur van de Schotse Hooglanden. Typerend is, dat in de meeste boeken die zijn verschenen over de indelingsproblematiek rond deze geologische perioden van het Paleoïcum het woord *Controversy* in de titel voorkomt.

In hetzelfde jaar dat het Paleozoïcum zijn naam kreeg, attendeerde Amanz Gressly (1814-1865) op het feit dat sommige formaties in de Zwitserse Jura eenzelfde lithologie bezaten over grote afstanden, andere lagen daarentegen lateraal belangrijke veranderingen lieten zien in lithologie en fossielinhoud. Hoewel deze veranderingen in textuur, samenstelling en fossielinhoud al waren opgemerkt door onder meer Antoine Lavoisier (1743-1794), Smith en Brogniart, stelde Gressly definities op en formuleerde de mogelijke oorzakelijke verbanden; hij noemde deze horizontale, en waarschijnlijk contemporaine variaties 'facies', naar het Latijnse woord voor 'aspect'; het is een in de stratigrafie sindsdien zeer uitgebreid gebruikte term. Johannes Walther (1860-1937) gaf rond de eeuwwisseling uitgebreide toelichting op de dynamische relaties van verschillende facies, waarbij hij aangaf dat

een horizontale verplaatsing van een bepaald afzettingsmilieu leidt tot voorspelbare verticale verspreiding van facies. Zo kreeg de stratigrafische ontwikkeling haar vierde dimensie, naast die van de drie-dimensionale ruimtelijke verspreiding, die van verandering in de loop van de tijd.

In de jaren '40 van de 19de eeuw werd de geologische kolom steeds verder onderverdeeld in nauwkeurig gedefinieerde eenheden. Alcide d'Orbigny (1802-1857) beschouwde de aardgeschiedenis te zijn verdeeld in 27 stadia, elk met zijn karakteristieke levensgemeenschappen. De grenzen waren scherp en veroorzaakt door grootschalige, catastrofale gebeurtenissen, mogelijk gerelateerd aan de afkoelingsfasen van de Aarde die waren voorgesteld door Léonce de Beaumont (1798-1894). De visie van d'Orbigny dat het leven werd beheerst door catastrofes van grootschalige vernietiging en de daarop volgende 'herschepping', was in sterke tegenstelling met het idee van Lyell van langzame, gradueel veranderende processen die op Aarde werkzaam zijn. Deze laatste visie beïnvloedde ook Darwin, die in zijn *Origin of Species* (1859) veranderingen in de levensgemeenschappen ook verklaart door geleidelijke transformatie. De geschiedenis heeft de stratigrafische inzichten van d'Orbigny voor het overgrote deel in het gelijk gesteld, hoewel zijn theoretische verklaringen voor een belangrijk deel zijn verworpen. De stratigrafie gebruikt nog altijd vele etagenamen die door d'Orbigny werden gegeven en we weten nu dat vele scherpe grenzen in de biologische ontwikkeling terug te voeren zijn tot veranderingen in de leefomstandigheden op Aarde, veroorzaakt door geologische processen en de reactie daarop van het leven, die aanleiding geeft tot *punctuated equilibria* ('onderbroken evenwichten').

Albert Oppel (1832-1865) volgde een andere weg dan die van zijn mentor d'Orbigny. Tijdens zijn veldwerk in het Juragebergte stelde Oppel fossielzones op door het zeer nauwkeurig, laag voor laag verzamelen en determineren van de fossielen; hiermee kon het voorkomen in de tijd van bepaalde soorten en van gemeenschappen van soorten worden bepaald. Hoewel de grote klacht van veel van zijn tijdgenoten en navolgers was dat Oppel nooit een behoorlijke definitie en omschrijving van zijn methoden heeft gegeven, is - en wordt tot op heden - zijn werkwijze algemeen gebruikt in de stratigrafie met het onderbrengen van fossiele gemeenschappen in biozones - *current range zones* -. De grenzen ervan worden bepaald door het eerste verschijnen van bepaalde soorten in de gesteente-opeenvolging en het verdwijnen van deze, of andere gelijktijdig levende soorten op een hoger niveau in de gesteenteserie. Daarmede kan een kleine verticale zone worden onderscheiden waarin bepaalde typerende soorten naast elkaar bestaan of een aantal elkaar overlappen. Er is daarmede een gedetailleerde tijdsopeenvolging op te stellen die ook goed toepasbaar is voor correlatie en het onderscheiden van korte tijdsperioden. Deze fundamentele methode in de biostratigrafie is sinds de tijd van d'Orbigny en Oppel eigenlijk niet meer veranderd.

Bij de internationale geologische congressen in Parijs (1878) en Bologna (1881) werd uitgebreid gediscussieerd over het formuleren en opzetten van een kader voor de stratigrafische nomenclatuur, waarin onderscheid moest kunnen worden gemaakt tussen (1) de gesteente-opeenvolging, (2) de biologisch onderscheiden zonering, en (3) de segmenten van relatieve en absolute geologische tijd. Hieruit ontstonden de categorieën der lithostratigrafische-, biostratigrafische-, chronostratigrafische- en geochronologische eenheden. De eerste stratigrafische code met de verschillende termen voor gebruik in Noord-Amerika verscheen in 1933 en na verdere discussies stelde de 'American Commission on Stratigraphic Nomenclature' in 1961 een 'Code of Stratigraphic Nomenclature' op. Op basis van deze nomenclatuur werd in 1967 de 'International Stratigraphic Guide' opgesteld door een commissie onder leiding van Hollis Hedberg (1903-1988). Een overzicht van de ontwikkeling van de geologisch kolom en van de benaming van de tijdvakken gaven Harland et al., in Geological Time Scale, 1989. Zie kader.
Tot op de dag van vandaag worden er discussies gevoerd over de terminologie en vaststelling van begrenzingen van de verschillende eenheden op basis van verdere veldgegevens.

In het begin van de 20ste eeuw kreeg de stratigrafie er door de zoektocht naar aardolie een heel belangrijk en krachtig instrument bij in de vorm van de micropaleontologie, waardoor vele tijdvakken in een groot aantal zeer korte taxonomische zones konden worden verdeeld en grote aantallen fossielen konden worden onderscheiden, niet alleen in de gesteentemonsters van kernboringen, maar ook in kleine steensplinters van het gruis van boringen met de roterende boorkoppen.
Een waarlijke revolutie in verscheidene gebieden van de aardwetenschappen is opgetreden in de laatste decennia van de 20ste eeuw door de ontwikkeling van een groot aantal nieuwe onderzoekstechnieken. De stratigrafie heeft daarbij sterk geprofiteerd door de toepassing van onder meer de radiometrische methode van absolute dateringen, de magneto-stratigrafische methoden, de sequentie-stratigrafie, hoge-resolutie-analyse van geologische gebeurtenissen, kwantitatieve correlatie en een verscheidenheid aan geofysische middelen. De technologie maakt het mogelijk om Precambrische formaties die geen fossielen bevatten te correleren met behulp van radiometrische dateringen. Stratigrafische kaarten, profielen en kolommen worden door de computer getekend, maar een meer fundamentele ontwikkeling is dat veel basisgegevens verkregen worden door de reflectieseismiek, de dateringen van de omkeringen van de polariteit van het aardmagnetische veld en variaties in de verhoudingen van stabiele isotopen van vele chemische elementen, onder meer van ^{12}C en ^{13}C; het zijn allemaal methoden die volledig onbekend waren in de periode vóór de Tweede Wereldoorlog. De facies-analyse evolueerde van een zuivere beschrijving naar de ontwikkeling van dynamische modellen van facies-evolutie. Radiometrische en paleomagnetische data werden gekoppeld aan biologische veranderingen. Het belang van snelle, samenhangende, zelfs catastrofale gebeurtenissen werd steeds duidelijker. De cycli van wisselingen in zeeniveau en van klimaatveranderingen, onder meer veroorzaakt door de Milankovitch-cycli, werden herkend in de gesteenteopeenvolging. Hoge-resolutiestudies bekijken veranderingen op millimeterschaal in geochemie en micropaleontologie. Ook de interpretatie van grootschalige structuren en veranderingen is veranderd en wordt nu ondergebracht in het proces van de plaattektoniek en uitgewerkt

Geological Time Scale 2004

In 2004 verscheen de nieuwste uitgave van de Geologic Time Scale van de International Commission on Stratigraphy (ICS), door F.M. Gradstein, J.G. Ogg, A.G. Smith, et. al. (Cambridge University Press).
Deze tijdschaal is, samen met de International Stratigraphic Chart en andere afgeleide tabellen, op het internet aanwezig onder www.stratigraphy.org Ze kunnen worden gedownload, evenals een artikel van F.M. Gradstein en J.G. Ogg over de nieuwe indeling: *Why, how and where next!*
Het meest opvallend is wel het verdwijnen van de Systeem/Periode-namen Tertiair en Kwartair. Deze werden vervangen door respectievelijk Paleogeen en Neogeen.

in computermodellen van de dynamische ontwikkeling van dalingsbekkens.
Een duidelijk voorbeeld van de verrijzenis van de stratigrafie uit de 19de eeuwse ideeën over de wereldvisie is de sequentie-stratigrafie die in sedimentaire opeenvolgingen series onderscheidt die begrensd worden door nonconformiteiten - zoals een erosieoppervlak of een niveau waar geen sedimentatie is opgetreden - die het begin en einde van een cyclus van transgressie en regressie aangeven, waarbij verborgen grenzen kunnen worden opgespoord met geofysische technieken. Van de 19de eeuw tot op de dag van vandaag zijn er aanhangers geweest van wereldwijde invloed van diastrofisme op de sedimentaire geschiedenis: dit betreft de grootschalige bewegingen van de aardkorst, zoals epirogenese en orogenese, die resulteren in veranderingen van posities van gesteenten en van structuren. In de loop van de geschiedenis werden deze veranderingen onder meer verklaard door de afkoeling en inkrimping van de Aarde, via de vorming van geosynclinalen tot het huidige, algemeen aangehangen proces van de plaattektoniek. Iedere belangrijke verandering van de aardkorst kan verplaatsingen veroorzaken in de waterlaag en leiden tot een hoger of lager zeespiegelniveau met als resultaat het respectievelijk overstromen van delen van de continenten - de transgressie - of het teruggaan van de zee dat de regressie tot gevolg heeft. Een overstromingsfase kan een sedimentserie achterlaten, een regressie leidt tot erosie en nonconformiteiten, ofwel hiaten in de gesteenteserie.
Veel belangrijk onderzoek naar de sequentie-stratigrafie en de relatie met wereldwijde wisselingen in het zeeniveau, die veelal worden veroorzaakt door de bewegingen van de aardkorstplaten, is uitgevoerd door een onderzoeksgroep van Exxon onder leiding van P. Vail.
Naast de opmars van geofysische technieken is de geochemie in toenemende mate van belang om de oorzaken op te sporen van massale extincties, temperatuurwisselingen op Aarde en variaties in de isotopenverhoudingen van bepaalde elementen in de sedimentseries. Met de integratie van oude methoden en nieuwe technieken is de stratigrafie in staat om steeds nauwkeuriger beelden te schetsen van de geografie, het klimaat en tektonische omgeving ten tijde van ver verwijderde perioden in de geschiedenis van de Aarde.

Tyrannosaurus rex: een HIJ of een ZIJ?

Hoe kom je te weten of een skelet van de machtige *T-rex* van een mannetje of een vrouwtje is? Je kunt het niet snel controleren door eventjes de staart op te tillen en te kijken wat eronder verborgen zit. Normaal gesproken is het zeer moeilijk om het geslacht van een dinosaurus te bepalen.
De enige zekere manier bestaat uit het vinden van eieren in de lichaamsholte. Anders is het niet meer dan gissen. Sommige paleontologen hebben wel geopperd dat de vrouwtjes meer ornamenten op haar kop hadden, of dat haar skelet verschilde van dat van mannetjes, maar zulke theorieën blijken in de praktijk nagenoeg onmogelijk te bewijzen.
Maar wetenschappers onder leiding van Mary Higby Schweitzer van de North Caroline State University hebben iets gevonden waarmee ze denken te kunnen aantonen dat het skelet dat twee jaar geleden in Montana werd opgegraven van een vrouwtje was – een zwanger vrouwtje wel te verstaan. Het skelet haalde de krantenkoppen in de VS in maart van dit jaar, toen hetzelfde team van paleontologen rapporteerde dat voor het eerst zacht materiaal van een dinosaurusbot bewaard gebleven was.
De reden dat het in dit skelet gevonden werd ligt in het feit dat het werd aangetroffen in een zeer afgelegen gedeelte van Montana in de Hell Creek Formatie. Het was zo afgelegen dat het skelet met een helikopter opgehaald moest worden. Om in de helikopter te passen moest het dijbeen in twee delen worden gebroken. Toen Schweitzer het gebroken dijbeen uitpakte viel haar meteen het zeer goed bewaard gebleven zachte materiaal op.
De groep ontdekte een substantie die veel weg heeft van merg. Dit is een substantie die normaal gesproken de binnenzijde van de holle botten van moderne vrouwelijke vogels bekleedt; het is dicht en bevat veel bloedvaten, nodig voor het transport van calcium tijdens de ontwikkeling van de eieren. De therapoden, de groep waartoe de *Tyrannosaurus rex* behoort, lijkt daardoor nog dichter bij de vogels te staan dan bij de hedendaagse reptielen. Hoewel het rennen voor de grote *Tyrannosaurus rex* nogal wat voeten in de aarde had, bestond het skelet al uit holle botten; een eigenschap die het voor vogels makkelijker maakt om te kunnen vliegen. De vondst impliceert dan ook dat het in dit geval om een vrouwtje gaat. Schweizer merkte op dat de *Tyrannosaurus rex* haar eieren produceerde op een manier vergelijkbaar met vogels, vooral de struisvogel en emu, en waarschijnlijk beduidend anders dan bijvoorbeeld de krokodil. In krokodillen krijgen alle eieren tegelijkertijd hun harde schaal, maar in vogels ontwikkelen de eieren hun harde schaal een voor een en het merg dient dan als een soort opslag voor het benodigde calcium.
De techniek heeft echter ook nadelen. Hoewel de aanwezigheid van dit mergachtige materiaal eenduidig aantoont dat het om een vrouwtje gaat, wil de afwezigheid ervan nog niet zeggen dat het dan een mannetje betreft. Ten eerste kan dit relatief zachte materiaal slecht geconserveerd zijn. Ten tweede moet het bot in een doorsnede worden bekeken en er zullen de nodige curatoren in musea zijn die hun botten niet willen laten doorzagen enkel en alleen om te zien wat het geslacht is. Tevens, als de parallel met vogels ook verder opgaat, bezat het vrouwtje dat materiaal alleen gedurende de periode van eieren leggen, waarbij de aanleg wordt gestimuleerd door het hormoon estrogen. Dit betekent dat het vrouwtje moest zijn gestorven tijdens de periode van eierproduktie, dat het zachte materiaal gefossiliseerd moest raken en dan ook nog eens door de mens worden gevonden.

Literatuur

Schweitzer, M.H., Wittmeyer, J.L. en Horner J.R. (2005): Gender-specific reproductive tissue in Ratites and *Tyrannosaurus rex*. Science, 308, 1456-1460.

Theo Kloprogge