

'n Oorsig van die geskiedenis van die aarde*

C.P. Snyman

Departement Geologie, Universiteit van Pretoria, Pretoria 0002

UITTREKSEL

Op grond van die beginsel van aktualisme moet die vroeë geskiedenis van die aarde ontrafel word aan die hand van huidige natuurverskynsels en die basiese natuurwette.

Die studie van die sonnestelsel lei tot die gevolgtrekking dat die planeete as neweprodukte ontstaan het toe die son uit 'n roterende wolk van kosmiese gas en stof gevorm het. Die protoplanete of planetesimale kon vanweë onderlinge botsings groter gegroei en ook gedeeltelik gesmelt het, sodat hulle gedifferensieer het in 'n kors, mantel en kern op grond van digtheidsverskille.

Elke gesteenteformasie op die aardkors verteenwoordig 'n sekere tydsverloop, en deur die formasies in die regte volgorde te plaas, word in werklikheid tydeenhede chronologies gerangskik. Die duur van hierdie tydeenhede kan binne nou perke deur radiometriese tegnieke bepaal word.

Oseanografiese en paleomagnetiese navorsing sedert die Tweede Wêreldoorlog het sekere verskynsels aan die lig gebring wat net bevredigend deur die teorie van plaattektoniek verklaar kan word. Daarvolgens word nuwe seevloer voortdurend by die mid-oseaanrug gevorm, beweeg daarvandaan uitwaarts en word uiteindelik in diepseetrôe langs eilandboë en sommige kontinente vernietig met die gepaardgaande ontstaan van aardbewings, vulkane en plooibergreeks.

Die Suider-Afrikaanse subkontinent is opgebou uit 'n aantal kleiner kratone en mobiele gordels (vroëere plooibergreeks) wat oor 'n tydperk van sowat 3 500 Ma deur interne geologiese prosesse verstewig het tot 'n stabiele skildgebied.

ABSTRACT

The early history of the earth

In view of the principle of actualism the early history of the earth must be explained on the basis of present-day natural phenomena and the basic Laws of Nature.

The study of the solar system leads to the conclusion that the planets were formed as by-products when the sun developed from a rotating cloud of cosmic gas and dust. The protoplanets or planetesimals could have accreted as a result of mutual collisions, during which they could have become partly molten so that they could differentiate into a crust, a mantle and a core on the basis of differences in density.

Every rock formation on the earth's crust represents a certain time span, and by placing the different formations in the correct sequence, time units are in reality being arranged chronologically. The duration of these time units can be determined within narrow limits by means of radiometric techniques.

Oceanographic and palaeomagnetic research since World War II brought certain phenomena to light which can only be explained satisfactorily by the theory of plate tectonics. According to this theory new ocean floor is continually being formed at the mid-ocean ridge, spreads laterally and is ultimately consumed at the deep-sea troughs adjacent to island arcs and some continents, with the concomitant generation of earthquakes, volcanoes and fold mountain chains.

The Southern African subcontinent consists of a number of smaller cratons and mobile belts (earlier fold mountains) which stiffened over a period of about 3 500 Ma to a stable shield area as a result of internal geological processes.

Hoewel die Sumeriërs, Hindoes, Babiloniërs en Grieke merkwaardige wiskundige en sterrekundige ontdekkings gemaak het, was hulle die spoor totaal byster sover dit geologiese verskynsels betref. Dink maar aan die gode wat vir die verskillende natuurkragte verantwoordelik gehou is – Neptunus as die heerser van die see, Poseidon as die god van aardbewings en Vulkanus as die heerser oor vulkaniese werking.

Thales van Miletus (624-565 v.C.) het opgemerk dat die Nyldelta geleidelik groter word weens die

afsetting van slied en sand, en daarom het hy besluit dat water (een van die oorspronklike elemente in die Griekse mitologie, nl. water, lug, aarde en vuur) oorsprong gee aan aarde. Dit kan beskou word as die eerste tree in die rigting van die wetenskap, weg van bygeloof af.

Ten spyte van hierdie belowende begin het die wetenskap feitlik geen vordering gemaak vir die volgende 2 000 jaar nie. So is die bekende Giant's Causeway in Noord-Ierland wat ontstaan het deur see-erosie van suilvormige basalt, vertolk as 'n poging van die reus Finn MacComhal om 'n trap oor die see te bou om sy aartsyand Fingal aan te val wat vir hom 'n soortgelyke vesting op die Eiland Staffa gebou het.

*Referaat gelewer tydens die Afdeling Chemie van die Suid-Afrikaanse Akademie vir Wetenskap en Kuns se simposium oor *Die kosmiese horlosie*, Pretoria, 2 Mei 1986.

Met die opkoms van die Christendom het die aansporing om die natuur te bestudeer, grootliks verdwyn. Die mense was tevrede met die Bybelse verklaring van waarom dinge gebeur en het gevolglik nie belang gestel om uit te vind hoe hulle gebeur het nie. Dit is ook algemeen geglo dat die aarde in sy huidige vorm slegs 'n paar duisend jaar tevore geskape is en dat dit gou weer tot niet sou gaan.

Twee faktore het egter bygedra tot die geleidelike ontwaking van die beoefening van die natuurwetenskap, nl. die feit dat die aarde tog nie tot niet gegaan het nie, en die opkoms van die alchemiste waardeur die filosofie en tegnologie – oftewel teorie en praktyk – by mekaar uitgekome het. Tydens die renaissance het hierdie bondgenootskap tussen teorie en praktyk wetenskapsbeoefening opnuut geprikkel.

Leonardo da Vinci (1452-1519) het tot die gevolgtrekking gekom dat landskapsvorme deur erosie uitgekerf en uiteindelik ook vernietig word; dat fossiele in die kalksteen van die Apennyngebergtes mariene-organismes verteenwoordig wat vroeër op die bodem van 'n see geleef het wat die huidige Italië oordek het; en dat die organismes nie tydens die sondvloed tot binne-in die rotse waarvan hulle 'n integrale deel vorm, ingespoel kon gewees het nie. Maar Da Vinci was sy tyd ver vooruit, en drie eeue sou verloop voordat die sondvloed nie meer 'n struikelblok vir die vooruitgang van geologie was nie.

1. AKTUALISME

James Hutton (1726-1797) word as die vader van die moderne geologiese wetenskap beskou. In 1785 het hy onbetwisbare bewyse gelewer dat die sedimentêre gesteentes op die aarde sekere kenmerke vertoon wat ooreenstem met dié van sand, slied en modder wat tans afgeset word. Dit dui dus daarop dat die groot diktes van sedimentêre gesteentes wat op die vasteland blootgestel is, 'n baie lang tydperk van erosie en afsetting verteenwoordig. Met geniale insig het hy beweer dat die geskiedenis van die aarde verklaar moet word in terme van die basiese natuurwette wat algemeen geldig is, en nie deur die leer van katastrofisme of die mite van herhaaldelike vernietiging van die aardoppervlak deur geweldige bonatuurlike rampe nie. Die leer van aktualisme impliseer dus dat dieselfde natuurwette en -prosesse wat

ons tans ken, ook in die verlede werksaam was. Dit beteken egter nie dat die tempo waarteen die prosesse plaasgevind het, nie van tyd tot tyd en van plek tot plek kon gewissel het nie. Sir Charles Lyell het die aktualiteitsbeginsel in 1830 bondig saamgevat in die bekende woorde "The present is the key to the past".

Hutton se werk het baie min erkenning gedurende sy lewe gekry, hoofsaaklik vanweë die feit dat daar algemeen op Bybelse gronde geglo is dat die aarde in die jaar 4004 v.C. geskape is.

2. DIE SONNESTELSEL

Die son en die hemelliggame binne sy swaartekragveld wentel om die middelpunt van die Melkweg in 'n baan wat sowat 2 700 ligjare van die middelpunt af geleë is. Die Melkweg is 'n reuse spiraalnewel van sowat 47×10^9 sterre. Miljoene soortgelyke spiraalnewels en ook skynbaar ongeordende newels van kosmiese stof en gas is in die hemelruim bekend. Die naaste is die spiraalnewel Andromeda sowat $2\,600 \times 10^6$ ligjare van ons af weg.

Die sonnestelsel bestaan uit nege planete en hulle satelliete, die asteroïede en die komete. Die komete is versprei oor 'n gedeelte van die hemelruim wat ongeveer duisend maal groter is as die afmetings van die planetêre stelsel en hulle omring die son en die planete aan alle kante soos 'n swerm muggies. Hulle is meesal ver van die planete verwyder, maar van tyd tot tyd beweeg 'n komeet van sy verafgeleë posisie in 'n eksentriese baan in die rigting van die son; beweeg daaromheen en verdwyn weer tydelik of permanent in die onpeilbare ruimte.

Die planete kom op redelike reëlmatige afstande van die son af voor volgens die sogenoemde Titus-Bodewet wat uit die agtiende eeu dateer. Deur 0,4 te tel by die reeks 0---0,3---0,6---1,2--- word die benaderde afstande in Astronomiese Eenhede (AE), van die planete na die son, verkry. ('n AE is die gemiddelde afstand van die aarde na die son.) Net by Neptunus en Pluto is daar groot afwykings (tabel 1).

Na die ontdekking van Uranus deur Herschel in 1781 op 'n afstand van 19,2 AE vanaf die son was sterrekundiges daarvan oortuig dat daar 'n planeet op 2,8 AE moes wees. In 1801 is die grootste asteroïed, nl. Ceres, deur Piazzi ontdek en vandag is

TABEL 1
Berekende en werklike afstande tussen die son en die planete

	Mercurius	Venus	Aarde	Mars	(Asteroïede)	Jupiter	Saturnus	Uranus	Neptunus	Pluto
	0 + 0,4	0,3 0,4	0,6 0,4	1,2 0,4	2,4 0,4	4,8 0,4	9,6 0,4	19,2 0,4	38,4 0,4	76,8 0,4
Bereken: Titus-Bodewet	0,4	0,7	1,0	1,6	2,8	5,2	10,0	19,6	38,8	77,2
Werklik:	0,39	0,72	1,0	1,52	—	5,2	9,53	19,2	30,4	39,5

daar honderde van hulle bekend in die sogenaamde asteroïedegordel tussen Mars en Jupiter. Steurings in die omwentelingsbaan van Uranus is in 1846 vertolk as die gevolg van die aantrekkingskrag van 'n onbekende planeet en dit het gelei tot die ontdekking van Neptunus.

2.1 Die kenmerke van die planete

Die vier binneste of terrestriële planete is baie soortgelyk aan die aarde sover dit hulle samestelling betref. Daar is tog belangrike verskille:

- i) Mercurius besit geen atmosfeer nie, hoofsaaklik vanweë sy lae swaartekrag, sodat enige atmosfeer wat dit moontlik aanvanklik gehad het, in die hemelruim ontsnap het. Dit het ook na sy ontstaan vinnig afgekoel sodat interne geologiese prosesse reeds vroeg in sy geskiedenis tot 'n einde gekom het. Net soos die maan word sy oppervlak dus deur meteorietkraters oorheers, aangesien die kraters nie deur vulkaniese uitbarstings of erosie vernietig kon word nie.
- ii) Mars het 'n baie dun atmosfeer en interne en eksterne geologiese prosesse het vir 'n betreklike lang periode aangehou. Mars vertoon dus ewe veel getuigenis van meteorietkraters en normale geologiese prosesse soos yskappe by die pole, droë riviervalleie en tekens van stofstorms.
- iii) Venus en die aarde het weens hulle groter massas hulle atmosfere behou en interne prosesse soos aardbewings en vulkanisme kon as gevolg van hulle interne hitte steeds voortgaan. Erosiever-skynsels het verder bygedra om vroeëre meteorietkraters grotendeels te vernietig of te verbloem, en slegs enkeles het as sodanig behoue gebly, soos die bekende Barringer-krater in Arizona.

Venus is baie armer aan water en ryker aan koolsuurgas as die aarde. Die koolsuurgasryke atmosfeer van Venus het skynbaar verhoed dat sonenergie wat die planeet as straling met 'n kort golflengte bereik, deur infrarooi-straling kon ontsnap. Waterdamp kon dus nooit kondenseer nie, en kon selfs tot in die eksosfeer opstyg vanwaar dit na fotodissosiasie as waterstof en suurstof in die ruimte kon ontsnap. Die "kometers" van koolsuurgas verklaar ook die hoë temperatuur van Venus (470°C), terwyl die algehele gebrek aan 'n atmosfeer die oorsaak is vir die geweldige verskille in dag-en-nagtemperatuur op Mercurius (350 en -170°C) en die maan (110 en -170°C).

Sonder lewende organismes en die gepaardgaande fotosintese sou die aarde 'n groot mate van ooreenkoms met dié van Venus gehad het. Dit word vandag algemeen aanvaar dat, hoofsaaklik onder die invloed van intense sonwinde, die aarde se oeratmosfeer (indien dit ooit bestaan het) grootliks tydens sy ontstaan ontsnap het, dat die huidige atmosfeer ontstaan het deur ontgassing van gesteentes in die binneste van die aarde, en dat die samestelling daarvan met die verloop van tyd gewysig is deur fotosintese.

Sover dit die bou van die planete betref, is betroubare gegewens net vir die aarde beskikbaar. Afleidings in dié verband is gebaseer op die verskil in gemiddelde digtheid van die korsgesteentes (2,65 t/m³) en dié van die aarde in die geheel (5,52 t/m³), wat impliseer dat die aarde 'n kern van baie digte materiaal besit; die sterk magnetiese veld (31 000 tesla) wat impliseer dat die kern metallies moet wees; en die voortplantingsgedrag van seismiese golwe. Daarvolgens is afgelei dat die aarde opgebou is uit 'n kors, mantel en kern (tabel 2).

TABEL 2
Die bou van die aarde

Onderverdeling		Diskontinuititeit/Diepte	Hoofbestanddele
Kors			
		Litosfeer	Silikon en Aluminium (Sial)
Mantel	Bo-mantel	Mohorovicic (6-8 km onder oseane 30-70 km onder kontinente)	
	Onder-mantel	Astenosfeer (Laespoedsone) (60-250 km)	Silikon en Magnesium (Sima)
Kern	Buite-kern	Gutenberg (2 400 km)	Nikkel en Yster (Nife-vloeibaar)
	Binne-kern	Middelpunt (6 378 km)	Nikkel en Yster (Nife-solied)

Die astenosfeer bestaan waarskynlik uit soliede materiaal en 'n klein hoeveelheid tussenkorrelrige silikaatsmeltel, sodat dit plasties is.

2.2 Gesteentes uit die ruimte

Meteoriete word vertolk as asteroïede of selfs as komete wat as gevolg van herhaaldelike steurings in hulle wentelbane onder invloed van die swaartekrag van groter planete in die swaartekragveld van die aarde beland het. Die meeste word grootliks gesublimeer sodra hulle die aarde se atmosfeer binnedring, maar enkeles bereik wel die aardoppervlak soos die bekende Hoba-meteoriet naby Grootfontein in S.W.A. met 'n beraamde massa van 60 ton. Verskillende soorte meteoriete word onderskei, nl.

- i) Steenmeteoriete (aeroliete) bestaan uit silikate van yster, magnesium en kalsium en word onderverdeel in gewone chondriete, koolstofhoudende chondriete en achondriete. Die chondriete word gekenmerk deur klein, ronde korrels of chondrules met die voorkoms van druppelvormige rotsmateriaal wat skynbaar uit 'n gesmelte toestand gekonsolideer het terwyl die druppels in 'n verstrooide vorm was. In die koolstofhoudende chondriete kom die chondrules voor in 'n grondmassa van koolstofhoudende, teeragtige materiaal vermeng met hidroksielhoudende silikaatminerale. Chondriete verskil heeltemal van enige bekende gesteente op aarde. Achondriete bevat nie chondrules nie en kom chemies en mineralogies met sekere basiese en ultrabasiese gesteentes op aarde ooreen.
- ii) Ystermeteoriete (sideriete) bestaan uit 'n legering van nikkel en yster, en toon dikwels kenmerkende ontmengingsteksture tussen nikkelryk en nikkelarm gedeeltes. Hierdie sogenaamde Widmanstättenstruktuur dui op 'n lae afkoelings tempo oor die temperatuurgebied 600 tot 400°C.
- iii) Yster-steenmeteoriete (sideroliete) bestaan uit silikaatminerale en yster-nikkellegering in min of meer gelyke hoeveelhede.
- iv) Glasagtige meteoriete (tektiete) is chemies soortgelyk aan aardkorsmateriaal. Volgens die nuutste opvattinge is hulle afkomstig van meteorietkraters op aarde of op die maan – dié wat in Indo-Sjina en Australië voorkom, word selfs direk gekoppel aan die maankrater Tycho met sy "speke".

Na die eerste maanlanding is vasgestel dat die gesteentes op die oppervlak van die maan op 'n vroeë stadium van sy bestaan in 'n gesmelte toestand moes gewees het. Die donker vlekke (maria) bestaan uit fynkorrelrige basalt wat groot ooreenkoms toon met basaltiese gesteentes op die aarde, hoewel hulle meestal baie ryker is aan titaan en kalsium. Die maria word omring deur hooglande wat uit ligkleurige basiese stollingsgesteentes bestaan wat veral ryk is aan kalsium en aluminium. Die oorheersing van hierdie twee tipes stollingsgesteentes dui daarop dat daar 'n proses van chemiese en petrologiese fraksionering (of differensiasie) moes plaasgevind het van die primitiewe gesteentemateriaal (vermoedelik chon-

drities in samestelling) waaruit die maan oorspronklik opgebou is. Maangesteentes is verder opmerklik arm aan vlugtige metale (natrium, kalium, antimoon, bismut, lood en sink) en bevat geen hidroksielhoudende minerale nie.

2.3 Die ontstaan van die planete

Dit word algemeen aanvaar dat die planete as neweprodukte ontstaan het toe die son uit 'n digte, roterende wolk van kosmiese gas en stof gevorm het. Deur saamtrekking het elkeen van die gevormde stukke (die latere stersisteme) 'n sekere hoekmomentum geërf van die draaikolke in die oorspronklike wolk, en met verdere saamtrekking sou elke eenheid vinniger roteer ten einde sy hoekmomentum te behou. Deur die verhoogde hoeksnelheid sou elke stuk die vorm van 'n skyf aanneem en uiteindelik sou 'n ewewig ontstaan tussen onderlinge saamtrekkings- en sentrifugale kragte sodat verdere vergroting van stukke nie meer moontlik sou wees nie. Indien 'n fragment aanvanklik reeds 'n hoë hoekmomentum gehad het, sou dit selfs opbreek om twee- en selfs meervoudige stersisteme te vorm waarin elkeen van die lede om hulle gemeenskaplike swaartepunt wentel. Die meeste van die sterre in die Melkweg is inderdaad sulke dubbelsterre, en die sonnestelsel het dus uit 'n stuk van die oorspronklike gaswolk ontstaan wat van die begin af 'n lae hoekmomentum gehad het.

Hierdie stuk het waarskynlik in 'n protoson ontwikkel wat deur 'n skyfvormige newel omring was waaruit die planete ontstaan het. Dit sou die lae inklinasie van die bane van die planete en hulle gemeenskaplike omwentelingsrigting om die son kon verklaar. Vaste deeltjies in die protoplanete sou deur swaartekrag na hulle middelpunte beweeg het om daar 'n digte saamgroeiing of planetesimaal te vorm. Die planetesimale kon uiteindelik verenig om planete te vorm. Hierdie vaste deeltjies was waarskynlik soortgelyk aan chondrules, sodat die planetesimale se samestelling moontlik ooreengestem het met dié van chondritiese meteoriete.

Op die rand van die skyfvormige newel waar die temperatuur laag was, sou vlugtige bestanddele kon kondenseer en saamgroeï om die buitenste planete te vorm, terwyl akkresie van gewone chondriete meer tipies sou kon wees van die middelste gedeelte van die newel waar die temperatuur hoër was, en die terrestriële planete dus ontstaan het. Deur akkresie en onderlinge botsings kon sommige planetesimale die grootte van asteroïede (honderde km in middellyn) bereik, en op daardie stadium sou 'n groot gedeelte van die gas in die newel reeds in die ruimte ontsnap het. Deur perturbasies of steurings sou die wentelbane van die planetesimale meer eksentrië word en onderlinge botsings sou meer intens wees as gevolg van hoër omwentelingsnelhede, sodat slegs groteres behoue sou kon bly en selfs groter sou kon word ten koste van kleineres. Asimmetriese botsings tussen relatief groot planetesimale sou ook die rotasietempo en -rigting en selfs die inklinasie van die rotasie-as van 'n planetesimaal wat behoue bly, kon

verander. Die kinetiese energie van die planetesimale sou tydens onderlinge botsings grootliks in hitte omskep word, sodat die temperatuur aan die buitekant van die planetesimaal sou styg, en hoe groter die planetesimale word, hoe hoër is die intensiteit van die botsings en hoe hoër styg die temperatuur. Smelting sou selfs kon plaasvind en dit kon lei tot die differensiasie in die kors, mantel en kern van die uiteindelige planeete op grond van digtheidsverkilte. In die laaste stadiums van akkresie kon 'n dun lagie van materiaal wat by lae temperatuur stabiel is (soortgelyk aan die koolstofhoudende chondriete) tot die buitenste planeete toegevoeg word, en die binneste planeete sou mettertyd ook van hierdie materiaal uit die ruimte kon opvang om so die atmosfeer van Venus, die aarde en Mars te vorm.

Dit is egter net so aanneemlik dat die huidige atmosfeer van die aarde mettertyd uit die binneste van die aarde "uitgesweet" is deur vulkaniese aktiwiteit waardeur veral waterdamp, koolsuurgas en stikstof en ondergeskikte hoeveelhede edelgasse, waterstof en swael vrygestel is. Suurstof ontbreek egter heeltemal as 'n komponent van vulkaniese gasse. 'n Klein hoeveelheid suurstof het waarskynlik saam met osoon in die eksosfeer ontstaan deur fotodissosiasie van waterdamp, en deur turbulente atmosferiese strome kon 'n gedeelte daarvan teruggevoer gewees het na die aardoppervlak waar dit waarskynlik voldoende was om primitiewe organismes soos blou-groen alge te kon onderhou. Met die ontstaan van die eerste plantlewe het fotosintese ook begin waardeur steeds meer suurstof uit die vulkaniese koolsuurgas geproduseer is – aanvanklik baie stadig, maar geleidelik vinniger namate die plantbevolking toegeneem het.

Die aanneemlikste hipotese vir die ontstaan van die maan is dat dit gevorm is deur die akkresie van stof wat die aarde uit die primitiewe newel in 'n baan om homself versamel het. Die asteroïede verteenwoordig hoogs waarskynlik oorblywende planetesimale uit die vroegste stadium van akkresie van die terrestriële planeete wat nie daarin kon slaag om 'n planeet te vorm nie, vanweë die gety-effek van Jupiter waardeur sommige waarskynlik selfs verder opgebreek is. Die komete is eweneens veronderstel om oorblywende planetesimale te verteenwoordig wat egter buitekant die baan van Jupiter ontstaan het waar "ys" stabiel was. Hulle eksentriese wentelbane word toegeskryf aan steurings deur die buitenste planeete, en baie van hulle is moontlik selfs vanweë dié steurings uit die sonnestelsel geslinger.

In die lig van die groot aantal sterre in die Melkweg ontstaan die vraag of daar nog soortgelyke sonnestelsels kan bestaan waarin planeete voorkom en waarop daar moontlik lewe soortgelyk aan dié op die aarde aanwesig is. Verreweg die meeste van die sterre in die Melkweg is dubbelsterre sodat enige planeete wat hulle mag hê vanweë perturbasies uiters onreëlmatige wentelbane sou volg totdat hulle met een van die "sonne" bots of heeltemal uit die sisteem geslinger word. Slegs planeete wat óf baie naby aan óf baie ver van so 'n dubbelster af wentel, sal 'n

reëlmatige baan kan volg, maar hulle sal normaalweg óf so warm óf so koud wees dat lewe daarop onmoontlik is.

3. GEOLOGIESE TYD

Wat ookal die ware vroeë geskiedenis van die aarde mag wees, het dit aan die einde van sy astronomiese ontwikkeling heelwaarskynlik geen atmosfeer gehad nie. In daardie stadium is die aardoppervlak vermoedelik by uitstek gekenmerk deur meteorietkraters en die aanwesigheid van verbroke meteoritiese materiaal. Die aarde se geologiese geskiedenis het begin met die vroeë differensiasie in 'n kors, mantel en kern en die gepaardgaande ontstaan van die atmosfeer en die oseane.

3.1 Relatiewe tyd

In baie gevalle is dit slegs moontlik om relatiewe ouderdomme van geologiese gebeurtenisse vas te stel aan die hand van die gesteentes wat op sekere plekke voorkom, want elke gesteente is die gevolg van sekere gebeurtenisse in die aarde se geskiedenis. Elke gesteente verteenwoordig dus 'n sekere tydsverloop. Deur die verskillende vaste gesteentes op die aardkors in die regte chronologiese opeenvolging te plaas, word in werklikheid tydeenhede (wat egter nie ewe lank is nie) in hulle regte volgorde gerangskik.

Tydens die vorming van sedimentêre gesteentes word lae afgesit sodat 'n jonger laag altyd bo-op 'n ouer laag lê. Dit staan bekend as die *wet van die opeenvolging van lae*. Van plek tot plek op die aardkors kan soortgelyke chronologiese opeenvolgings van lae of sogenoemde normaalprofiële opgestel en met mekaar vergelyk word. Op grond van sekere ooreenkomste in algemene kenmerke van die gesteentes in die normaalprofiële kan sekere lae met mekaar in verband gebring of gekorreleer word. In baie gevalle is daar in so 'n reeks normaalprofiële van verskillende plekke egter lae wat nie deurgaans aanwesig is nie – in baie gevalle omdat hulle deur erosie verwyder is voordat die daaropvolgende laag afgeset is. Sulke onderbrekings in die sedimentasieproses staan bekend as diskordansies of diastemas. Andersins kan sekere lae ook ontbreek omdat hulle op 'n bepaalde plek net nooit afgeset is nie (sogenoemde hiate of gapings). In sulke stratigrafiese korrelasies is die fossielinhoud van die gesteentes dikwels van deurslaggewende belang.

Geen ander ontdekking het so 'n groot invloed op die ontwikkeling van geologie gehad as die een van fossiele wat gebruik kan word om die opeenvolging van gesteentelae te bepaal en om gesteentelae oor groot afstande (selfs van een kontinent na 'n ander) te korreleer nie. Vroeg in die negentiende eeu het Cuvier en Brongniart vasgestel dat die fossielversameling in gesteentes sistematies verander in ooreenstemming met die chronologiese volgorde van die lae, en dat die fossiele in die jonger lae groter ooreenkoms toon met die huidige vorms van lewe as die fossiele in die ouer lae. Die klaarblyklike gevolgtrekking is dus dat die relatiewe ouderdom van 'n laag in 'n opeenvolging van sedimentêre gesteentes

bepaal kan word op grond van die fossiele wat dit bevat, of anders gestel: Gesteentes wat soortgelyke fossielversamelings bevat, is van dieselfde ouderdom (die *wet van faunale opeenvolging of van opeenvolging in die diereryk*).

Op grond van die wette van faunale opeenvolging en die opeenvolging van lae is die sedimentêre gesteentes dwarsoor die wêreld chronologies gerangskik om 'n geologiese kolom te vorm. Oorspronklik is die kolom in erateem, sisteme en serieë verdeel, gebaseer op skielike veranderings van die fossielversamelings in die sedimentêre opeenvolgings van Europa as gevolg van diskordansies of hiate. Namate stratigrafiese werk van Europa na ander kontinente uitgebrei het, is fossielversamelings in gesteentes gevind wat intermediêr was tussen twee "tipe"-versamelings wat in Europa deur 'n diskordansie of hiaat geskei word, sodat die grense tussen twee opeenvolgende gesteente-eenhede nie oral op aarde ewe duidelik is nie, en die onderverdelings moet dus eerder as arbitrêr en gerieflik beskou word en nie as natuurlike onderverdelings wat regdeur die wêreld geld nie. Indien die vroeë stratigrafiese navorsing nie in Europa nie, maar op 'n ander kontinent gedoen gewees het, sou grense tussen die internasionale sisteme en serieë (soos trouens ook die name van die onderverdelings) heel anders daaruit gesien het.

Aangesien elke gesteentelaag en dus ook elke serie, sisteem en erateem in die geologiese kolom 'n sekere tydverloop verteenwoordig, vorm hulle die basis vir die tydingeling van die geologiese geskiedenis van die aarde (chronostratigrafie) en dieselfde benamings word trouens vir die tydeenheid in die internasionale geologiese tydskaal gebruik.

3.2 Absolute tyd

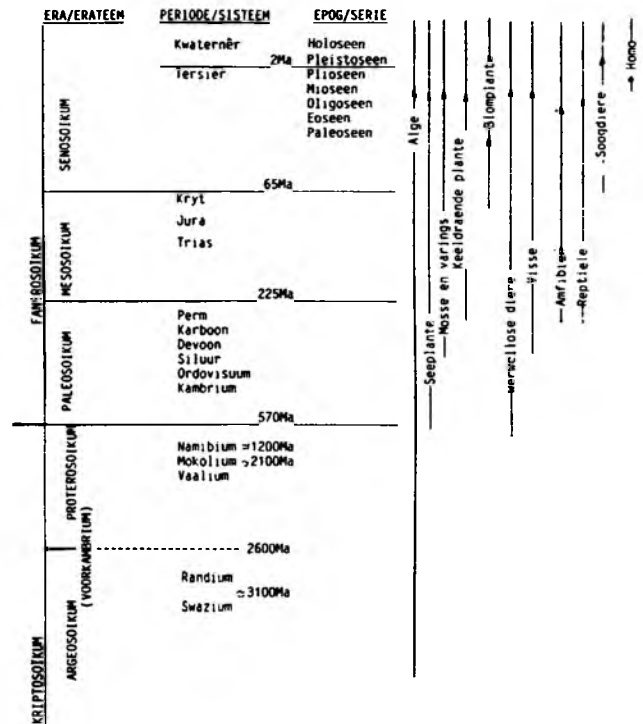
Met die ontdekking van radioaktiwiteit deur Becquerel in 1896 het nuwe vergesigte in al die natuurwetenskappe oopgegaan, onder andere ook die ontdekking dat dit moontlik is om absolute geologiese tyd binne nou perke vas te pen op grond van die vervaltempo van die radioaktiewe elemente. So het geochronologie, die studie van tyd in die geologiese geskiedenis van die aarde, tot sy reg gekom.

Die belangrikste radioaktiewe isotope wat vir die geochronologiese doeleindes gebruik word, is die volgende:

Moederelement	Dogterelement	Halveringstyd
¹⁴ C	¹⁴ N	5 730 jaar
⁴⁰ K	⁴⁰ A	1 300 × 10 ⁶ jaar
⁸⁷ Rb	⁸⁷ Sr	47 000 × 10 ⁶ jaar
²³⁵ U	²⁰⁷ Pb	713 × 10 ⁶ jaar
²³⁸ U	²⁰⁶ Pb	4 510 × 10 ⁶ jaar
²³² Th	²⁰⁸ Pb	1 390 × 10 ⁶ jaar
¹⁵⁷ Sm	¹⁴³ Nd	1 060 × 10 ⁸ jaar

Van die vier loodisotope is slegs ²⁰⁴Pb nie van radiogene oorsprong nie. Deur van die veronderstelling uit te gaan dat ²⁰⁶Pb, ²⁰⁷Pb en ²⁰⁸Pb alles van

radiogene oorsprong is en volgens die teoretiese vervalkurwes van hulle moederelemente ontstaan het, is die ouderdom van die aarde vasgestel op sowat 4 500 × 10⁶ jaar (4 500 Ma). Die waarde stem baie goed ooreen met die ouderdom van meteoriete en verteenwoordig waarskynlik die stadium van akresie van die planeet.



FIGUUR 1: Die geologiese tyd- en gesteenteskaal en die ontwikkeling van organismes.

Deur kalibrering van die geologiese tydskaal (fig. 1) het dit aan die lig gekom dat die Paleosoïkum, Mesosoïkum en Senosoïkum gesamentlik slegs sowat 15 persent (600 Ma) van die aarde se geologiese geskiedenis verteenwoordig. Aangesien die Voorkambrium feitlik geen fossiele bevat nie, is die onderverdeling van die geologiese kolom in die Voorkambrium uitsluitlik op die fisiese eienskappe en voorkoms van die gesteentes gebaseer. Op sommige plekke het die aardkors geologies lank gelede reeds 'n groot mate van stabiliteit bereik en was dit sedert die Voorkambrium nie aan grootskaalse tektoniese vervorming (veral plooiing) onderhewig nie. Sulke stabiele gebiede word kratone of skildgebiede genoem (bv. dele van Suid-Afrika, Kanada, Brasilië, Australië, Indië en Sibirië) en is by uitstek geskik om die geologiese geskiedenis van die aardkors tydens die Voorkambrium te bestudeer.

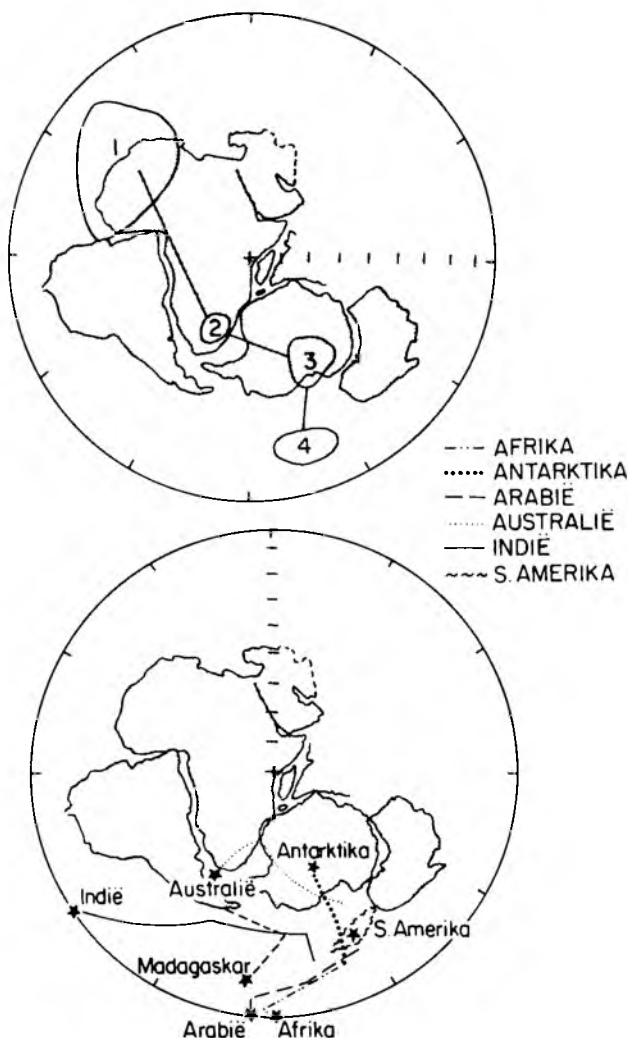
In die afwesigheid van fossiele is radiometriese ouderdomsbepalings onontbeerlik vir die historiese geologie van die Voorkambrium. Daar bestaan egter nog nie 'n wêreldwye chronologiese indeling vir die Voorkambrium nie, maar wel indelings vir elke afsonderlike skildgebied. So word die Voorkambrium in Suid-Afrika ingedeel in die Swazium, Randidium, Vaalium, Mokolium en Namibium.

3.3 Die magnetiese omkeringstydskaal

Magnetiethoudende gesteentes word tydens hulle ontstaan in ooreenstemming met die heersende magnetiese veld van die aarde gemagnetiseer. Die oriëntasie van hierdie oermagneetveld wat in die gesteentes vasgevang is, kan met geskikte meettegnieke bepaal word, en daar is op grond van sulke paleomagnetiese navorsing vasgestel dat die magnetiese veld van die aarde oor minstens die afgelope 80 Ma herhaaldelik van polarisasie verander het. Hierdie magnetiese omkeringstydskaal is met behulp van radiometriese ouderdomsbepalings redelik akkuraat gekalibreer in polariteitsepogs.

4. PLAATTEKTONIEK

Na die publikasie van die eerste betroubare wêreld-



FIGUUR 2: Skynbare poolswerfcurwes vir Gondwanaland. A, met Gondwanaland as eenheid word wesenlik een poolswerfcurwe verkry. Poolposisie vir die Kambrium tot Ordovisium (1), Devoon tot Karboon (2), Perm (3) en Mesosoïkum (4) word aangedui. B, na die Mesosoïkum is daar 'n divergensie van die skynbare poolswerfcurwes vir die verskillende gebiede. Die posisie van die huidige magnetiese suidpool word met sterre aangedui, en om die sterre te laat saamval, moet die kontinente tot hulle huidige posisies verskuif word. Die gegewens dui daarop dat Gondwanaland in die Mesosoïkum begin opbreek het (sien verw. 7).

kaarte het baie mense gespekuleer oor die moontlikheid dat die kontinente vroeër soos 'n legkaart in mekaar gepas het, en dat die kontinente sedertdien uitmekaar gedryf het. Wegener (1915) en Du Toit (1939) was veral voorstanders van die hipotese, hoofsaaklik vanweë sekere tektoniese, litologiese en paleontologiese ooreenkomste tussen die onderhawige suidelike kontinente, nl. Suid-Amerika, Suid-Afrika, Antarktika, Australië en Indië wat in die geologiese literatuur bekend is as Gondwanaland, teenoor Laurasië in die Noordelike Halfrond. Paleomagnetiese gegewens wat sedert 1950 aan die lig gekom het, het die vroeëre bestaan van so 'n superkontinent sterk gesteun, (fig. 2).

Sedert die Tweede Wêreldoorlog is die topografie van die seevloer in besonderhede gekarteer en veral drie belangrike verskynsels is ontdek, nl. aseismiese rûe, diepsee-trêe en die mid-oseaanrug (fig. 3).

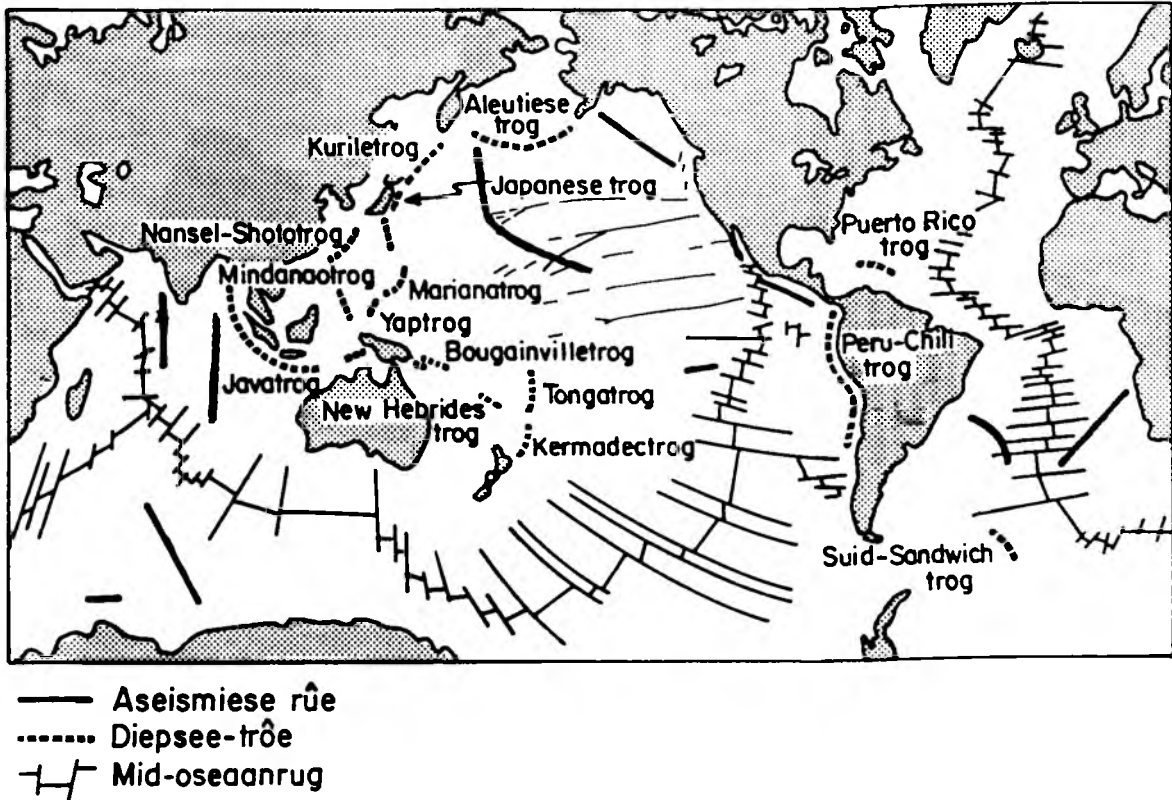
Aseismiese rûe word gekenmerk deur die afwesigheid van groot aardbewings en bestaan uit 'n ry vulkaniese eilande en ondersese vulkane waarvan die ouderdom van die een end na die ander afneem en slegs enkele van die jong vulkane aktief is, bv. Tristan da Cunha op die Walvisrug.

Diepsee-trêe is smal en diep (tot sowat 12 000 m) en kom voor ewewydig aan die rand van sommige kontinente of ewewydig aan eilandboë. Die gebied aan die landkant van die trêe word gekenmerk deur groot aardbewings, deur aktiewe vulkane wat hoofsaaklik silikaryke lawa produseer en deur uitgesproke anomale gravitasie- of Bouguerwaardes. Die diepte van oorsprong van die aardbewings vorm 'n smal sone wat onder die kontinent of eilandboog induik en wat as die Benioff-Wadatisone bekend is.

Die mid-oseaanrug is 'n groot ondersese bergreeks wat reg rondom die aarde voorkom. Dit is sowat 1 500 tot 2 000 km breed en sowat 2 000 tot 3 000 m hoër as die omringende seevloer. 'n Groot vallei of skeur kom op die kruin van die rug voor wat verder gekenmerk word deur vlak aardbewings, basaltiese vulkanisme vanaf spleeterupsies soos op Ysland en 'n hoë tempo van hittevloei uit die binneste van die aarde.

Hess het in 1960 beweer dat nuwe oseaniese kors voortdurend by die kruin van die mid-oseaanrug gevorm word deur die opstyg en konsolidasie van lawa uit die mantel van die aarde langs die sentrale skeurvallei. Dit beteken dus dat die oseaanvloer ouer moet word hoe verder dit van die mid-oseaanrug af weg is. In 1963 is dit deur middel van die magnetiese omkeringstydskaal bevestig, en die oseaanvloer weerskante van die sentrale skeurvallei toon inderdaad 'n simmetriese magnetiese streping wat met epogs van normale en omgekeerde polarisasie ooreenstem. Met die magnetiese omkeringstydskaal is ook vasgestel dat die gemiddelde tempo waarteen die oseaanvloer sywaarts vanaf die mid-oseaanrug beweeg, sowat 10 tot 60 mm per jaar is. Later is deur radiometriese ouderdomsbepalings op boorkern van die seevloer bewys dat die huidige seevloer hoogstens 200 Ma oud is.

Die aseismiese rûe is in 1963 toegeskryf aan



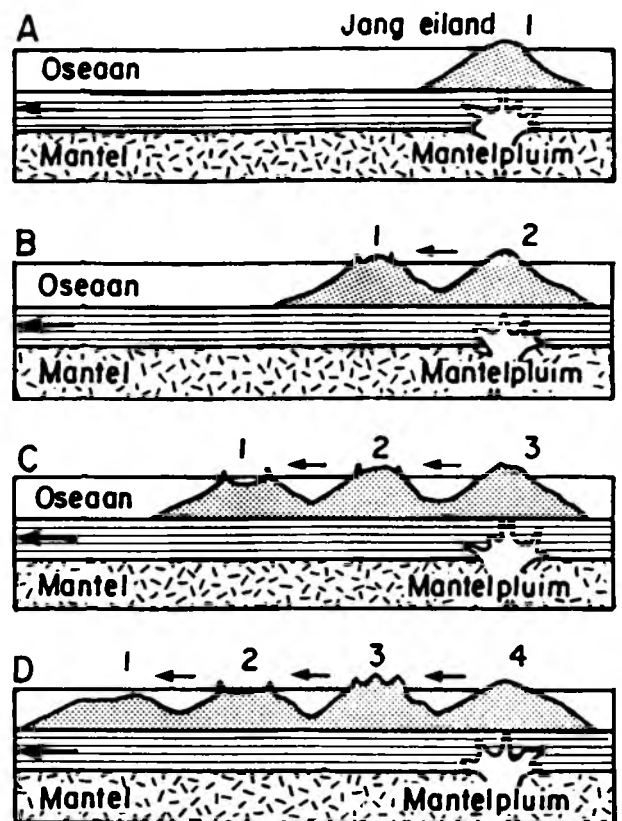
FIGUUR 3: Diepseetrôe, aseismiese rûe en mid-oseaanrûe (sien verw. 8, gewysig).

hipotetiese "mantelpluime" van warm gesteentemateriaal waaroor 'n litosferiese plaat in 'n bepaalde rigting op die astenosfeer beweeg. Daardeur word litosferiese gesteentemateriaal periodiek bokant die mantelpluim opgesmelt en dit gee aanleiding tot die ontstaan van vulkane wat in 'n bepaalde rigting langs die rug progressief ouer word (fig. 4).

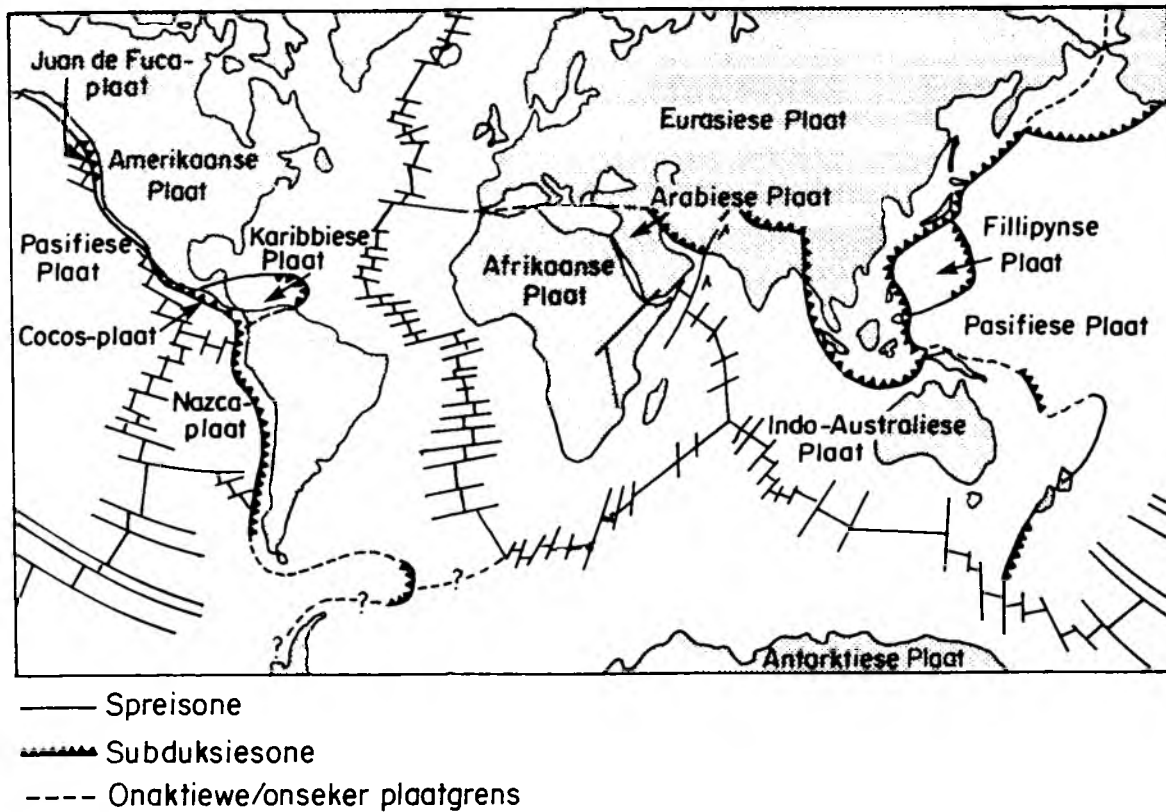
Volgens die teorie van plaattektoniek gly die uitdyende seevloer wat by die mid-oseaanrug ontstaan, uiteindelik vanweë sy hoër digtheid onder die kontinente in. Die diepsee-trôe langs eilandboë en sommige kontinente ontstaan deur saamsleuring en plooiing van die oseaanvloer en die sedimente daarop tydens die aftrekking of subduksie van die oseaniese kors. Die anormale gravitasiewaardes oor die trôe ontstaan deurdat ligte materiaal verhoed word om op te styg tot 'n hoogte in die kors wat ooreenstem met die digtheid daarvan. Die aardbewings in die Benioff-Wadatisone ontstaan weens wrywing tussen die kontinentale en oseaniese plate tydens die aftrekking, en gedeeltelike smelting van kontinentale en oseaniese korsmateriaal lei tot die vorming van oorwegend silikaryke lawa en die gepaardgaande vulkaniese werking.

'n Tiental litosferiese plate word onderskei wat soos 'n legkaart in mekaar pas, en waarvan die grense gedefinieer word deur relatiewe smal gordels waarin seismiese en vulkaniese aktiwiteit by uitstek gekonsentreer is (fig. 5).

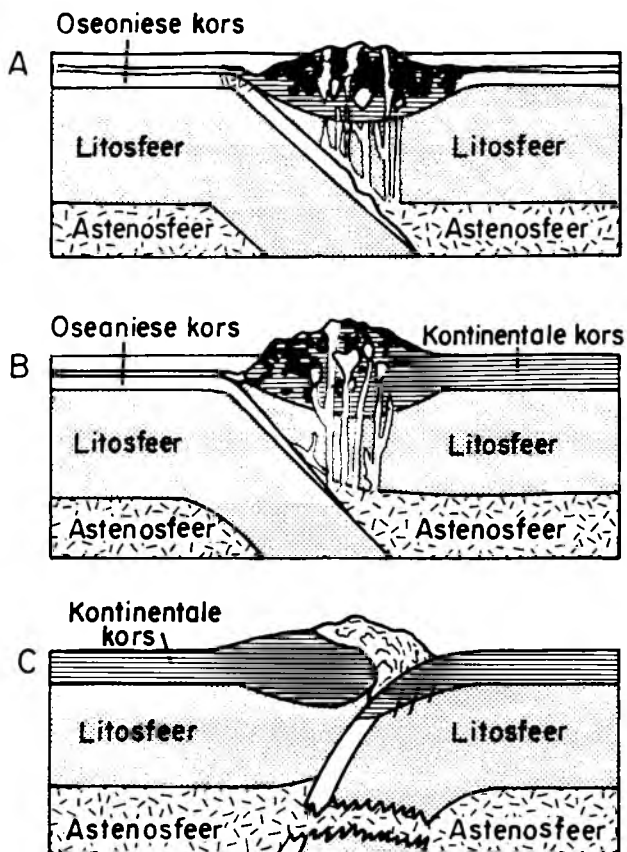
Subduksie kan plaasvind tussen twee oseaniese plate soos in Japan; tussen 'n oseaniese en 'n kontinentale plaat soos aan die weskus van Suid-



FIGUUR 4: Beweging van 'n litosferiese plaat oor 'n mantelpluim met die gevolglike ontstaan van 'n ry vulkane wat in 'n bepaalde rigting jonger word – 1 is die oudste en 4 die jongste vulkaan (sien verw. 5, gewysig).



FIGUUR 5: Litosferiese plate met grense wat gedefinieer word deur smal sones waarin vulkaniese en seismiese aktiwiteit by uitstek gekonsentreer is (sien verw. 5, gewysig).



FIGUUR 6: Verskillende tipes van subduksie. A. Tussen twee oseaniese plate (bv. Japan) B. Tussen 'n oseaniese en 'n kontinentale plaat (bv. Andes) C. Tussen twee kontinentale plate (bv. Himalayas) (sien verw. 5).

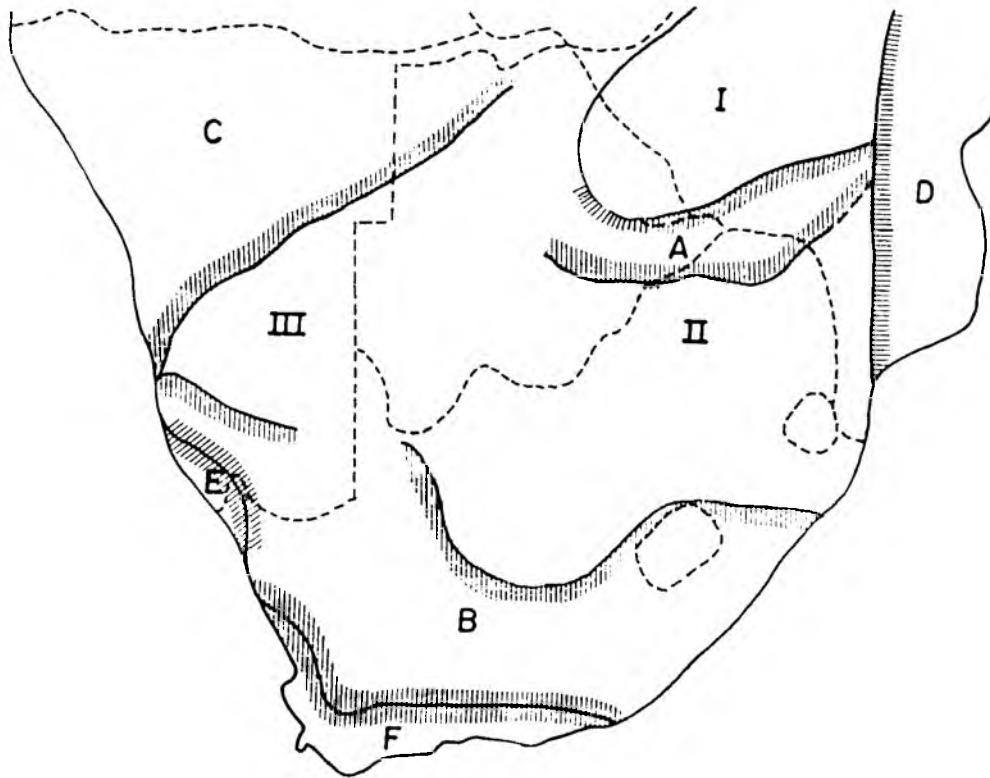
Amerika en tussen twee kontinentale plate soos die Indo-Australiese plaat en die Eurasiese plaat. Dit gaan altyd gepaard met plooiing en die vorming van plooiagebergtes soos die Andes- en Himalayagebergtes (fig. 6).

In terme van die teorie kan selfs 'n kringloop in die vorming van kontinente en oseane onderskei word. Daarvolgens sou die Sentraal-Afrikaanse slenkdaalstelsel en veral die Rooisee die beginstadium in die vorming van 'n nuwe oseaan voorstel en die eilandboogsituasie die beginstadium, die Andessituasie 'n meer gevorderde stadium, en die Himalayasituasie die finale stadium van kontinentvorming. Daar deur word die vroeëre diepseetrog of mobiele gordel tot 'n kraton verstewig en uiteindelik deur langdurige erosie in 'n skiervlakte omskep. Al aanduiding van die vroeëre plooiereeks is 'n litteken van hoogs gevormde gemetamorfoseerde gesteentes op die kraton.

Hoewel die teorie van plaattektoniek 'n goeie verklaring bied vir die struktuur, ontstaan en ouderdom van die seevloer en vir die huidige verspreiding van vulkane, aardbewings en plooi Gordels op aarde, sowel as vir die huidige verspreiding van die kontinente, is dit moeilik om die geologie van Voorkambriese kontinentale skildgebiede daarby te laat inpas. Tog word dit deur baie geleë beskou as die grootste deurbraak in die geologiese wetenskap – die begin van 'n “nuwe geologie”.

5. DIE GEOLOGIESE ONTWIKKELING VAN SUID-AFRIKA

Die grootste gedeelte van die Suider-Afrikaanse subkontinent is 'n Voorkambriese skildgebied. Dit is



FIGUUR 7: Die tektoniese raamwerk van Suider-Afrika.

Mobiele gordels: A Limpopo (3,8 – 1,8 Ga)

B Namakwa (3,0 – 1,0 Ga)

C Damara (2,1 – 0,5 Ga)

D Mosambiek (0,9 – 0,5 Ga)

E Gariep (0,9 – 0,5 Ga)

Kratone:

F Saldanha-Kaap (0,9 – 0,3 Ga)

I Zimbabwe (3,5 – 3,0 Ga)

II Kaapvaal (3,5 – 3,0 Ga)

III Namibië (> 1,8 Ga)

(sien verw. 11)

opgebou uit 'n aantal kleiner kratone wat deur mobiele gordels (vroëere plooi-gordels) vanmekaar geskei word (fig. 7).

Die oudste gesteentes is die sogenaamde Sandrivier-Gneis met 'n minimum ouderdom van 3 860 Ma. Dit vorm self egter deel van die Limpopo mobiele gordel met 'n ouderdom van 1 800 Ma.

Die Barberton-Opeenvolging van ultrabasiese, basiese en suur metalawas en metasedimente vorm saam met granitiese gneise deel van die Kaapvaal-kraton. Die granitiese gneise is gedeeltelik ouer (> 3 510 Ma) en gedeeltelik jonger (> 3 490 Ma) as die Barberton-Opeenvolging. Die oudste van hierdie gneise is relatief meer verryk aan nikkels en chroom, wat tipies is van basaltiese gesteentes, as die jongeres. Dit dui daarop dat hulle moontlik ontstaan het deur gedeeltelike opsmelting van 'n primordiale basaltiese kors. Op dié manier kon sialiese eilande of protokontinente ontwikkel wat deur akkresie verder kon vergroot om uiteindelik deur erosie sedimentêre materiaal te lewer vir die vorming van die metasedimente van die Barberton-Opeenvolging. Die oorspronklike kontinentale kors is egter nêrens op aarde blootgestel nie.

Met toenemende verstewiging van die kors was die daaropvolgende sedimentasie op die Kaapval-kraton hoofsaaklik in intrakratoniese komme wat met die verloop van tyd steeds groter geword het.

In die suide het die verstewiging van die Namakwalandse mobiele gordel eers heelwat later

plaasgevind, en die Kaapse plooi-gordel verteenwoordig die laaste episode van grootskaalse vervorming van korsgesteentes in Suid-Afrika.

BIBLIOGRAFIE

- Bergamini, D. (1970). *The universe* (Life-Time International, The Netherlands).
- Bott, M.H. (1982). *The interior of the earth* (Edward Arnold, London).
- Cillie, G.G. (1980). *Prof. Gawie kyk na die sterre* (Tafelberg, Kaapstad).
- Hallam, A. (1973). *A revolution in the earth sciences: from continental drift to plate tectonics* (Clarendon Press, London).
- Hamblin, W.K. (1985). *The earth's dynamic systems* (Burgess Publishing, Minneapolis).
- Holmes, A. (1965). *Principles of physical geology* (Nelson, London).
- McElhinny, M.W. (1973). *Palaeomagnetism and plate tectonics* (Cambridge University Press, London).
- Plummer, C.C. & McCreary (1982). *Physical geology* (Wm. C. Brown, Dubuque, Iowa).
- SACS (1980). *Stratigraphy of South Africa*. Part I (Comp. L.E. Kent). Hand. geol. Surv. S. Afr. 8. (Staatsdrukker, Pretoria).
- Strahler A. (1981). *Physical geology* (Harper & Row, New York).
- Tankard, A.J., Jackson, M.P.A., Eriksson, K.A., Hobday, D.K., Hunter, D.R. & Minter, W.E.L. (1982). *Crustal evolution of southern Africa* (Springer, New York).
- Tarling, D.H. (1971). *Principles and applications of palaeomagnetism* (Chapman & Hall, London).
- Wilson, J.T. (1976). Continents adrift and continents aground. Readings from *Scientific American* (Freeman, Oxford).
- Wood, J.A. (1979). *The solar system* (McGraw Hill, New York).