

DE WETENSCHAP VAN DE AARDE
OVER EEN LEVENDE PLANEET

“There is grandeur in this view of life, with its several powers, having been originally breathed into a few forms or into one; and that, whilst this planet has gone cycling on according to the fixed law of gravity, from so simple a beginning endless forms most beautiful and most wonderful have been, and are being, evolved.”

Charles Darwin (1809-1882), *On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life* (1859)

De wetenschap van de aarde

Over een levende planeet

Manuel Sintubin

Acco Leuven / Den Haag

Aan Erna.

Eerste druk: 2009

Tweede, herwerkte druk: 2011

Derde druk: 2012

Gepubliceerd door

Uitgeverij Acco, Blijde Inkomststraat 22, 3000 Leuven, België

E-mail: uitgeverij@acco.be – Website: www.uitgeverijacco.be

Voor Nederland:

Uitgeverij Acco, Blijde Inkomststraat 22, 3000 Leuven (België)

E-mail: info@uitgeverijacco.nl – Website: www.uitgeverijacco.nl

Omslagontwerp: www.frisco-ontwerpbureau.be

© 2011 by Acco (Academische Coöperatieve Vennootschap cvba), Leuven (België)

Niets uit deze uitgave mag worden veelelvoudigd en/of openbaar gemaakt door middel van druk, fotokopie, microfilm of op welke andere wijze ook zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de uitgever.

No part of this book may be reproduced in any form, by mimeograph, film or any other means without permission in writing from the publisher.

INHOUD

Ten geleide – Planeet Aarde in onze handen	13
HOOFDSTUK 1	
Planeet Aarde, portret van een planeet	17
1.1 De Aarde in het zonnestelsel	18
1.1.1 De Aarde en haar buren	18
1.1.2 De ‘bewoonbare zone’	21
1.1.3 Het Aarde-maansysteem	21
1.1.4 De beweging van de Aarde	24
1.2 De Aarde vanuit de ruimte	26
1.2.1 De vorm van de Aarde	26
1.2.2 Het aardoppervlak	28
1.3 De opbouw van de Aarde	31
1.3.1 De chemische samenstelling van de Aarde	31
1.3.2 De interne structuur van de Aarde	32
1.3.3 De ouderdom van de Aarde	34
1.4 Planeet Aarde, portret van een bijzondere planeet	34
HOOFDSTUK 2	
De vergeten revolutie	37
2.1 Een onveranderlijke wereld?	37
2.2 De geboorte van een nieuwe wetenschap	39
2.2.1 Geotheorieën	39

2.2.2	De geschiedenis van de Aarde	42
2.2.3	De ware ouderdom van de Aarde	44
2.3	Geologische tijd	45
2.3.1	Relatieve ouderdom	45
2.3.2	De geologische tijdschaal	48
2.3.3	Absolute ouderdom	52
2.3.4	Kalibreren van de geologische tijdschaal	54
2.4	Een metafoor voor het ‘diepe verleden’	55
2.5	‘Bursting the limits of time’	57

HOOFDSTUK 3

De Aarde in beweging 59

3.1	Tektoniek in de negentiende eeuw	60
3.2	Continente op drift	61
3.2.1	Drijvende continenten	63
3.2.2	Wat met Gondwana?	67
3.2.3	Continentendrift	68
3.3	Van continentendrift tot platentektoniek	70
3.3.1	Spreidende zeevloer	71
3.3.2	Bewegende aardplaten	75
3.3.3	Naar een nieuw paradigma	77
3.4	Terug naar de continenten	80
3.4.1	De contrarevolutie	81
3.4.2	Continental tektoniek	81
3.4.3	De motor achter de platentektoniek	83
3.5	Aardwetenschappen in beweging	84

HOOFDSTUK 4

Het paradigma van de platentektoniek 87

4.1	Lithosferische platen	88
4.1.1	Lithosfeer versus asthenosfeer	88
4.1.2	Lithosferische platen	91
4.2	Plaatgrenzen	91
4.2.1	Divergente plaatgrenzen	92

4.2.2	Convergente plaatgrenzen	94
4.2.3	Conservatieve plaatgrenzen	94
4.2.4	Drieplatenpunten	95
4.3	De motor achter de platentektoniek	95
4.3.1	Asthenosferische convectie?	95
4.3.2	Zwaartekracht als motor	97
4.4	Plaattektonische cycli	98
4.4.1	De Wilsoncyclus	98
4.4.2	De supercontinentcyclus	100
4.5	Plaatbewegingen	101
4.5.1	Relatieve en absolute plaatbewegingen	101
4.5.2	Met horten en stoten	104
4.6	Continental tektoniek	108
4.6.1	Continental korst	108
4.6.2	De opbouw van een continent	109
4.6.3	Continental korst en platentektoniek	112
4.7	Platentektoniek op mensenschaal	113
HOOFDSTUK 5		
	Gaia, de Aarde als een ‘levende planeet’	115
5.1	Gaia	115
5.1.1	De Gaiahypothese	116
5.1.2	De Gaiatheorie	117
5.2	‘Earth System Science’	119
5.2.1	Systeem	119
5.2.2	Tegen de tweede wet van de thermodynamica	120
5.2.3	Systeemdenken	121
5.2.4	Aardwetenschappen van de eenentwintigste eeuw	123
5.3	Systeem Aarde in een notendop	125
5.3.1	De drijvende krachten	125
5.3.2	De componenten	126
5.3.3	De wisselwerkingen	126
5.4	Aardwetenschappen, de studie van een ‘levende planeet’	126

HOOFDSTUK 6

Systeem Aarde, de drijvende krachten	129
6.1 Interne warmte	129
6.1.1 Warmteoverdracht aan het aardoppervlak	130
6.1.2 De oorsprong van de interne warmte	131
6.1.3 Kernvorming	133
6.1.4 Thermo-tektonische geschiedenis van de aardse planeten	134
6.1.5 Warmteoverdracht in de mantel	137
6.2 Externe energiebron	139
6.2.1 De Zon	139
6.2.2 Zonnestraling	140
6.2.3 Warmtebalans op Aarde	141
6.2.4 De zwakke-zonparadox	142
6.3 Een Goudlokjeplaneet	144

HOOFDSTUK 7

Systeem Aarde, de componenten	145
7.1 Geosfeer	145
7.1.1 Een reis naar het centrum van de Aarde	146
7.1.2 Seismische tomografie	151
7.1.3 Manteldynamica	151
7.1.4 De geodynamo	156
7.1.5 De magnetosfeer	157
7.2 Atmosfeer	157
7.2.1 De opbouw van de aardse atmosfeer	158
7.2.2 De samenstelling van de atmosfeer	160
7.2.3 Het broeikaseffect	161
7.2.4 De ozonlaag	162
7.2.5 Globale circulatie in de troposfeer	164
7.2.6 De oorsprong van atmosferische zuurstof	166
7.2.7 De aangroei van atmosferische zuurstof	167
7.2.8 De evolutie van de aardse atmosfeer	170
7.3 Hydrosfeer	172
7.3.1 Globale waterbalans	173
7.3.2 Zout water versus zoet water	173

7.3.3	De gelaagde opbouw van een oceaan	174
7.3.4	Zeestromingen	175
7.3.5	Het Kerstkind	178
7.3.6	Globale thermohaliene oceaancirculatie	179
7.3.7	Het zeeniveau	181
7.3.8	Getijden	183
7.3.9	Cryosfeer	184
7.4	Biosfeer	185
7.4.1	Fylogenetische stamboom	186
7.4.2	De oorsprong van het leven	187
7.4.3	Op weg naar fotosynthese	189
7.4.4	Een 'levende' planeet	191
7.4.5	Enkele ijkpunten in de evolutie van het leven op Aarde	191
7.5	De hoofdrolspelers van het 'kosmische experiment'	193

HOOFDSTUK 8

	Systeem Aarde, de wisselwerkingen	195
8.1	'Tijd als een stroom'	195
8.1.1	Toenemende helderheid van de Zon	196
8.1.2	Afkoelende Aarde	196
8.1.3	Groeiende continenten	198
8.1.4	Evoluerende mineralen	200
8.1.5	Atmosfeer uit evenwicht	201
8.1.6	Evoluerend leven	202
8.2	'Tijd als een golf'	203
8.2.1	De gesteentecyclus	204
8.2.2	De supercontinentcyclus, de hartslag van de Aarde	207
8.2.3	Kosmische sturing	212
8.2.4	Biogeochemische cycli	213
8.3	'Tijd als een puls'	216
8.3.1	Aardbevingen	216
8.3.2	Van vulkaan tot supervulkaan	222
8.3.3	Vloedbasalten	224
8.3.4	Massa-extincties	225
8.3.5	Inslagen	226
8.4	'Back to the future'	229

8.4.1	‘The present is the key to the past’?	229
8.4.2	‘The past is the key to the future’	230

HOOFDSTUK 9

4,5 miljard jaar aardse geschiedenis 231

9.1	Het hadeïcum, de geboorte van Planeet Aarde	231
9.1.1	De geboorte van de Aarde	232
9.1.2	De geboorte van de maan	232
9.1.3	De oudste korst	233
9.1.4	Het ontstaan van de vroegste atmosfeer	233
9.1.5	De eerste oceanen	234
9.1.6	Het ‘Grote Bombardement’	235
9.1.7	Het eerste leven	235
9.2	Het archeïcum, een onherkenbare wereld	235
9.2.1	Archeïsche platentektoniek?	236
9.2.2	Archeïsche continenten	237
9.2.3	Een broeikaswereld	238
9.2.4	Een prokaryotenwereld	238
9.3	Het proterozoïcum, de overgang naar de moderne wereld	239
9.3.1	Crisissen in het paleoproterozoïcum	240
9.3.2	Rodinia, het eerste supercontinent	241
9.3.3	Sneeuwballaarde	242
9.3.4	De <i>Ediacarabiota</i> , een mislukt ‘levensexperiment’	243
9.4	Het fanerozoïcum, met vallen en opstaan	244
9.4.1	Een dubbele supercontinentcyclus	245
9.4.2	Warm en koud	247
9.4.3	Een ‘levensexperiment’ vol onverwachte wendingen	249
9.5	Een toevalstreffer?	251

HOOFDSTUK 10

Planeet Aarde op mensenmaat 253

10.1	Een duik in de ijskelder	253
10.1.1	De laatste fase op weg naar onze ijskelderwereld	253
10.1.2	Hyperthermische gebeurtenissen	255

10.2	De moderne mens, het ‘kind’ van de ijstijden	258
10.2.1	De huidige ijskelderwereld	258
10.2.2	Adam en Eva	262
10.2.3	Leven tijdens de laatste ijstijd	265
10.3	Het holoceen, het einde van de chaos	267
10.3.1	De klim uit de laatste ijstijd	267
10.3.2	Het holoceen, een klimaatafwijking?	268
10.3.3	De ‘tuin van Eden’	269
10.4	Leven op Aarde, een risicovolle onderneming	274
10.5	De mens als een fruitvliegje	276

HOOFDSTUK 11

Een kijk in de toekomst 277

11.1	De kroniek van een aangekondigde dood	277
11.2	Het tijdperk van de mens	280
11.2.1	Het ‘hockey stick’-syndroom	280
11.2.2	De zesde massa-extinctie	281
11.2.3	Het antropoceen, een nieuw geologisch tijdvak?	284
11.3	Een kijkje in de toekomst: Planeet Aarde in de eenentwintigste eeuw	288
11.3.1	Terug naar een broeikaswereld?	288
11.3.2	Het tijdperk van de natuurrampen	290
11.3.3	De draagkracht van Planeet Aarde	293
11.4	De ongemakkelijke waarheid	296

HOOFDSTUK 12

Is Planeet Aarde uniek? 299

12.1	Exoplaneten	300
12.2	Een gevallenstudie: Planeet Aarde	302
12.3	‘Zeldzame Aarde’	305
12.3.1	Planetaire randvoorwaarden	305
12.3.2	Kosmische randvoorwaarden	307
12.4	Planeet Aarde, een uniek kosmisch experiment	309

EPILOOG

De schoonheid van Planeet Aarde	311
Een kwestie van toeval	311
Een kwestie van complexiteit	313
Een kwestie van nietigheid	313
De schoonheid van Planeet Aarde	314
Over de auteur	315
Bibliografie	317
Register	323

TEN GELEIDE

PLANEET AARDE IN ONZE HANDEN

“Civilization exists by geological consent, subject to change without notice.”
William James Durant (1885-1981), Amerikaans historicus en filosoof



De Verenigde Naties hebben het jaar 2008 uitgeroepen tot het *International Year of Planet Earth* (IYPE). Dit 'Internationaal Jaar van Planeet Aarde' is een gezamenlijk initiatief van de Unesco en de *International Union of Geological Sciences* (IUGS). Het IYPE dient een dubbele doelstelling: het moet de aandacht van het brede publiek vestigen op de nauwe band tussen de mensheid en Planeet Aarde en het toont aan hoe de aardwetenschappers een sleutelrol spelen in het verzekeren van een duurzame toekomst voor de mensheid op Planeet Aarde. Het leidmotief van het internationaal jaar is dan ook '*Earth Sciences for Society*' met als doel *“to capture people’s imagination with the exciting knowledge we possess about our planet, and to see that knowledge used to make the Earth a safer, healthier and wealthier place for our children and grandchildren”*.

De aardwetenschapper heeft inderdaad een bijzonder voorrecht. In zijn zoektocht naar 'het hoe en het waarom' verbaast hij zich er telkens weer over hoe wonderlijk Planeet Aarde in elkaar zit. Maar tegelijkertijd ziet hij ook hoe kwetsbaar de delicate evenwichten in de aardse systemen zijn. Met enige ongerustheid moet hij dan ook vaststellen dat de mens ontegensprekelijk een belangrijke omgevingsfactor geworden is. Als leerling-tovenaar grijpt de mens in op de aardse systemen zonder te beseffen wat de impact hiervan is op die evenwichten die Planeet Aarde een aangename thuis voor ons maken. De mens vindt het vanzelfsprekend dat hij al wat Planeet Aarde te bieden heeft naar eigen goeddunken kan – en mag – ontginnen zonder er al te veel bij stil te staan dat al deze natuurlijke rijkdommen – gaande van olie en aardgas, drinkbaar water tot het visbestand in de oceanen – eindig zijn.

We zijn vergeten dat we bij de gratie van Planeet Aarde leven. Niet alleen is de menselijke beschaving enkel mogelijk dankzij de natuurlijke rijkdommen van onze planeet,

bovendien spruit onze beschaving voort uit opmerkelijke veranderingen in de aardse systemen die zich in de laatste 10.000 jaar hebben voorgedaan. En hier komen we tot de essentie van Planeet Aarde. Onze planeet is een zelfregulerend systeem dat zich in een steeds veranderende kosmische omgeving in stand tracht te houden, en daardoor bevindt hij zich permanent in een staat van globale verandering – *‘global change’*. Daarnaast is ook de factor tijd een essentieel maar te weinig begrepen aspect van Planeet Aarde. De wereld rondom ons is er pas gekomen na **4,5 miljard jaar** turbulente aardse geschiedenis.

Doordat hij zich een waanbeeld van een onveranderlijke wereld voorhoudt, is de mens niet meer op zijn hoede. We zijn inderdaad vergeten dat we te gast zijn op een ‘levende planeet’ in een kosmisch schietkraam. Leven op Planeet Aarde is en blijft een risicovolle onderneming! Af en toe worden we hieraan herinnerd als Planeet Aarde zijn krachten op ons loslaat in de vorm van een aardbeving, orkaan of epidemie. Maar we beseffen te weinig dat het merendeel van de aardse processen niet volgens menselijke tijdschalen werkt.

In *‘global change’* ligt juist de kracht van Planeet Aarde. Het is een ware ‘overlevings-reflex’ van onze planeet. Maar hierin ligt ook een ‘ongemakkelijke waarheid’ – *‘an inconvenient truth’* – voor de mens. Planeet Aarde laat niet met zich sullen. Als een ‘levende planeet’ reageert hij op elke externe of interne verandering, dus ook op de menselijke ingrepen op de aardse systemen. De boodschap van Planeet Aarde werd krachtig samengevat door de Engelse auteur Herbert G. Wells (1866-1946): *“Adapt or perish, now as never, is nature’s inexorable imperative.”*

Achter het privilege van de aardwetenschapper om de wonderen van Planeet Aarde te ontrafelen, schuilt ook een belangrijke verantwoordelijkheid. We moeten onze kennis en verwondering over deze unieke planeet delen. Zo verbinden we er ons toe respect af te dwingen voor Planeet Aarde, om uiteindelijk iedereen ertoe aan te zetten duurzaam om te springen met de natuurlijke omgeving en met de natuurlijke rijkdommen die Planeet Aarde ons schenkt. Wij zijn de pleitbezorgers van onze planeet.

Mijn pleidooi vindt u alvast terug in dit boek. Hiermee hoop ik bij te dragen tot de verwezenlijking van een van de doelstellingen van het IYPE zoals opgenomen in de *Paris Declaration* (Unesco, februari 2008): *“... creating respect for Planet Earth, raising public awareness of the vulnerability and potential of the Earth’s components and mitigating natural hazards will provide the basis for a more peaceful, prosperous and fulfilled community of nations ...”*

In dit boek vertel ik het fascinerende levensverhaal van Planeet Aarde, tracht ik de geheimen achter dit unieke kosmische experiment te ontsluiten en laat ik u meeprouven van een boeiende wetenschap: de **geologie**.



De verweerde grafmonumenten in Petra (Jordanië) illustreren mooi de symbiose tussen menselijke beschaving en Planeet Aarde.

- ① Zie www.uitgeverijacco.be (code w2v8a6) voor meer materiaal en het extra hoofdstuk ‘*Van Gondwana tot Pangaea. De paleozoïsche geschiedenis van Noordwest-Europa*’. Wanneer dit extra digitale hoofdstuk meer informatie verschaft over een item aangehaald in dit boek, dan wordt daarnaar verwezen met het symbool ①.

HOOFDSTUK 1

PLANEET AARDE, PORTRET VAN EEN PLANEET

*“We came all this way to explore the moon, and
the most important thing is that we discovered the Earth.”*

William Anders, 24 december 1968, astronaut aan boord van Apollo 8

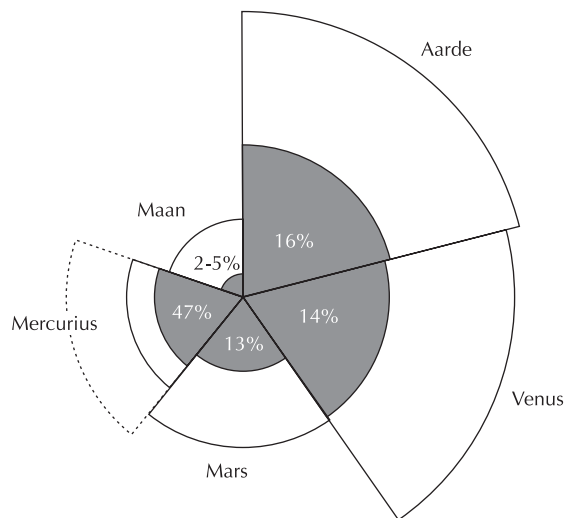
Ergens in het 13,7 miljard jaar oude, onmetelijke **heelal**, in de zogenaamde ‘**Grote Muur**’, een 500 miljoen lichtjaar (1 lichtjaar = ~10 biljoen km) lange, 300 miljoen lichtjaar brede en 15 miljoen lichtjaar dikke aaneenrijging van superclusters, bevindt zich aan de rand van de **Virgo Supercluster**, op, zo’n 250 miljoen lichtjaar van het centrum, de **Lokale Groep**, bestaande uit zo’n 30 tot 40 sterrenstelsels, gespreid over een diameter van 10 miljoen lichtjaar. De Lokale Groep wordt met een snelheid van 300 km/s (meer dan 1 miljoen km/u) naar het centrum van de supercluster aangezogen. Een van de sterrenstelsels van de Lokale Groep is de **Melkweg**, een spiraalstelsel met een doorsnede van 100.000 lichtjaar en een dikte van ongeveer 3.000 lichtjaar. Aan de rand van een van de spiraalarmen, de **Orion Arm**, op ongeveer 26.000 lichtjaar van het centrum van de Melkweg, bevindt zich het **zonnestelsel**. Met een snelheid van ongeveer 220 km/s (ongeveer 800.000 km/u) draait het zonnestelsel rond het centrum van de Melkweg. Een volledige omwenteling duurt meer dan 220 miljoen jaar, een galactisch jaar.

Centraal in het zonnestelsel staat een 4,6 miljard jaar jonge, middelgrote hoofdreeksster, onze **Zon**. Rondom de Zon draaien 8 planeten (Mercurius, Venus, Aarde, Mars, Jupiter, Saturnus, Uranus, Neptunus) met hun 166 manen, 3 dwergplaneten (Pluto, Ceres, Eris) met hun 4 gekende manen, en een veelheid van asteroïden, kometen en ander ruimtepuin. Op ongeveer 150 miljoen kilometer van de Zon, of op amper 8,3 lichtminuten, bevindt zich een planeet, **Planeet Aarde**, onze nietige uitkijkpost in dit immense heelal.

1.1 De Aarde in het zonnestelsel

1.1.1 De Aarde en haar burens

De Aarde is de derde planeet vanaf de Zon. De gemiddelde afstand tussen de Aarde en de Zon is ongeveer 150 miljoen kilometer (149.597.887,5 km). Deze afstand stellen we gelijk aan een **astronomische eenheid** (AU). Een astronomische eenheid is dus gelijk aan 8,3 lichtminuten. Zo ligt Mercurius op 0,38 AU, Venus op 0,72 AU, Mars op 1,52 AU, Jupiter al op 5,2 AU of 40 lichtminuten en Pluto uiteindelijk op 39,5 AU of 5,5 lichtuur van de Zon. De afstand van elk van deze planeten tot de Zon blijkt aan een zekere wetmatigheid te beantwoorden, waarbij deze afstand berekend wordt op basis van het rangnummer van de planeet. Deze wetmatigheid kennen we als de wet van Titius-Bode, genoemd naar de Duitse astronomen Johan Daniel Titius (1729-1796) en Johann Elert Bode (1747-1826).



FIGUUR 1.1. Vergelijking van de omvang en opbouw van de aardse planeten en de maan; de kern-mantelverhouding is weergegeven in percentages; de stippellijn voor Mercurius geeft het deel van de mantel aan dat waarschijnlijk is weggeblazen tijdens een 'kosmisch accident' (naar Condie 2005).

De Aarde is de grootste en zwaarste van de vier **aardse planeten**. Dit zijn de planeten waarvan het oppervlak voornamelijk bestaat uit vaste stof, in tegenstelling tot de gas- (Jupiter, Saturnus) en ijsreuzen (Uranus, Neptunus) verder weg in het zonnestelsel.

De aardse planeten en de maan hebben vele overeenkomsten. Ze hebben een zeer vergelijkbare gemiddelde dichtheid – tussen $3,34 \text{ g/cm}^3$ (maan) en $5,52 \text{ g/cm}^3$ (Aarde) – en dus waarschijnlijk een vergelijkbare gemiddelde samenstelling. Ook hun opbouw is zeer gelijkaardig. Eigenlijk zijn het allemaal metaalknikkers met een stenen (silicaatrijk) omhulsel (figuur 1.1). Zij dragen allemaal sporen van vulkanische activiteit. Zij ‘worstelen’ dan ook met eenzelfde probleem: afkoeling. Maar zoals verder zal blijken (zie hoofdstuk 6 – § 6.1.4), hebben de aardse planeten dit probleem op verschillende manieren aangepakt. Hierin speelt de omvang van elk van de planeten een belangrijke rol.

Vergelijken we de Aarde met haar dichtste burens, dan ontdekken we echter ook heel wat verschillen. Mercurius en Mars zijn de kleine broertjes in de familie. Het volume van **Mercurius**, de kleinste planeet van het zonnestelsel, is slechts 5% van dat van de Aarde. Mercurius heeft ook een relatief hoge gemiddelde dichtheid ($5,43 \text{ g/cm}^3$), wat enkel verklaard kan worden doordat de metaalkern van Mercurius ongeveer 66% van de totale massa uitmaakt. Mercurius heeft dan ook een extreem hoge kern-mantelverhouding (12 x deze van de Aarde); waarschijnlijk is die het gevolg van een ‘kosmisch accident’ vroeg in de geschiedenis van de planeet. Mercurius heeft geen atmosfeer maar wel een relatief zwak magnetisch dipoolveld ($\sim 1\%$ van het aardmagnetisch veld) en dus een magnetosfeer (zie hoofdstuk 7 – § 7.1.5). Het volume van **Mars** is ongeveer 15% van dat van de Aarde. Mars heeft een lichte koolstofdioxideatmosfeer. De atmosferische druk is ongeveer 0,6 kPa, minder dan 1% van de atmosferische druk op het aardoppervlak (101,3 kPa). Op het Marsoppervlak heerst een gemiddelde temperatuur van -53°C . Mars heeft geen magnetisch dipoolveld meer, al wijst de remanente magnetisatie (zie hoofdstuk 3 – § 3.3.1) van Marsgesteenten erop dat er ooit een magnetisch veld was. Mars heeft twee kleine, planetoïdeachtige maantjes, Phobos en Deimos. **Venus** lijkt zeer sterk op onze planeet. Ze is net iets kleiner en minder zwaar dan de Aarde (0,85 x het volume van de Aarde; 0,81 x de massa van de Aarde). Ook de dichtheid is net iets lager ($5,24 \text{ g/cm}^3$). Maar Venus heeft geen meetbaar magnetisch veld en een dichte koolstofdioxideatmosfeer. De atmosferische druk op het Venusoppervlak is 9,3 MPa, en de gemiddelde oppervlaktetemperatuur is ongeveer 477°C . Een Venusdag duurt 244 aardse dagen, terwijl een Venusjaar maar 224 aardse dagen duurt. Een Venusdag duurt dus langer dan een Venusjaar. Opmerkelijk is dat Venus niet alleen uitermate traag, maar ook tegengesteld rond haar as roteert; de obliquiteit (zie § 1.1.4) van haar rotatieas is dan ook 177° . Dat Venus geen maan heeft, kan hierin een rol gespeeld hebben.

Hemellichamen in ons zonnestelsel

De Zon is een ster. Een **ster** is een bolvormig hemellichaam dat bestaat uit geïoniseerd gas of plasma. Een ster is eigenlijk een gigantische kernfusiereactor. De kernfusie houdt een temperatuurgradiënt – en dus drukgradiënt – in stand die ervoor zorgt dat een ster in hydrostatisch evenwicht verkeert. De drukgradiënt compenseert immers de zelfgravitatie.

Om de status van een **planeet** te verkrijgen moet een hemellichaam volgens de Internationale Astronomische Unie (sinds augustus 2006) voldoen aan drie criteria: (1) het hemellichaam bevindt zich in een baan rond een ster; (2) het hemellichaam heeft voldoende massa om in hydrostatisch evenwicht te verkeren (en dus om bolvormig te zijn); en (3) het hemellichaam heeft de omgeving van zijn baan schoongeveegd van andere hemellichamen. Zo werd in augustus 2006 Pluto ‘gedegradeerd’ tot **dwergplaneet**, de categorie van de grootste planetoiden. Pluto bevindt zich immers in een gordel van planetoiden en kometen, de zogenaamde **Kuipergordel** (gelegen tussen 30 en 50 AU), en behoort tot de **Transneptunische Objecten**.

Planetoiden, kleine planeten, of asteroïden zijn steenachtige brokstukken die zich in een baan om de Zon bewegen. Deze hemellichamen kunnen qua grootte variëren van stofdeeltjes tot kleine planeten met een diameter van ongeveer 1.000 km. Het merendeel van dit ruimtepuin heeft een diameter tussen 20 en 30 km en een zeer onregelmatige vorm. Enkel de grootste planetoiden hebben voldoende massa om door zelfgravitatie bolvormig te worden. De kleinste stofdeeltjes en brokstukken, met een diameter van minder dan 10 meter, worden ook wel **meteoroïden** genoemd. Als zo’n meteoroïde in onze atmosfeer terechtkomt en opbrandt door de wrijving met de steeds dichtere atmosfeer (zie hoofdstuk 7 – § 7.2.1), noemen we dit een **meteoor**. Het lichtspoor kennen we natuurlijk ook als een ‘vallende ster’. Als zo’n brokstuk niet helemaal opbrandt in de atmosfeer en op Aarde terechtkomt, noemen we dat stuk ruimtepuin een **meteoriet**. Het merendeel van de asteroïden bevindt zich in de **planetoidegordel** gelegen tussen Mars en Jupiter (tussen 2,1 en 3,3 AU). In de baan van Jupiter vindt men ook nog een zwerm asteroïden, de **Trojanen**. Uiteindelijk vinden we tussen 0,9 en 1,3 AU nog een zwerm asteroïden. Dit zijn de **aardscheeders**. Hun omloopbaan ligt immers heel dicht bij of kruist de baan van de Aarde met alle mogelijke ramspoed tot gevolg.

Kometen zijn vuile ijsballen met een diameter kleiner dan 50 km en een dichtheid van minder dan 1 g/cm^3 . Hun omloopbaan rond de Zon is extreem elliptisch. Kometen die afkomstig zijn uit de Kuipergordel (transneptunisch), hebben een korte omlooptijd (enkele tientallen tot honderden jaren). Kometen kunnen echter ook afkomstig zijn uit de **Oortwolk**, een wolk van kometen op een afstand van ongeveer 50.000 tot 100.000 AU van de Zon (tussen 1 tot 2 lichtjaar). Zij hebben dan ook zeer lange omlooptijden (tot vele duizenden jaren).

In tegenstelling tot Venus, onze zusterplaneet, heeft de **Aarde** een maan, alsook een sterk magnetisch dipoolveld en dus een magnetosfeer (zie hoofdstuk 7 – § 7.1.5). De aardse atmosfeer is een stikstof-zuurstofatmosfeer (zie hoofdstuk 7 – § 7.2.2). Op onze blauwe planeet vinden we bovendien opmerkelijk veel water in zijn drie aggregatietoestanden (vast als ijs, vloeibaar als water, en gasvormig als waterdamp) (zie hoofdstuk 7 – § 7.3). En onze planeet is een thuis voor leven (zie hoofdstuk 7 – § 7.4). Opmerkelijk is ook dat het oppervlak van de Aarde heel wat minder ‘littekens’ draagt van kosmische inslagen (inslagkraters) dan dat van haar burens. Terwijl het oppervlak van de overige aardse planeten bezaaid is met inslagkraters, zijn er op Aarde niet meer dan 200 inslagkraters geïdentificeerd, waarvan amper 10% op de oceaانبodem. Schijnbaar heeft het aardoppervlak genoten van een ‘verjongingskuur’.

1.1.2 De ‘bewoonbare zone’

Het belangrijkste verschil met haar burens is zeker dat er leven is op Aarde. De Aarde ligt dan ook in de ‘**bewoonbare zone**’ rondom de Zon. De ‘bewoonbare zone’ (*‘habitable zone’*) wordt gedefinieerd als dat deel van het heelal waarin de omstandigheden gunstig zijn voor de ontwikkeling en het behoud van leven. Rond een ster vormt de ‘bewoonbare zone’ een schil, ook wel **ecosfeer** genoemd. In deze schil kan de oppervlaktetemperatuur van een planeet juist goed zijn om vloeibaar water toe te laten. Vloeibaar water wordt immers als essentieel beschouwd voor de ontwikkeling van leven. De positie van deze schil rondom een ster hangt in belangrijke mate af van de grootte van de ster en van haar helderheid (energieproductie). Rond de Zon strekt de huidige ‘bewoonbare zone’ zich uit van 0,95 AU tot 1,50 AU. Enkel de Aarde ligt nu dus in de ‘bewoonbare zone’ rondom de Zon. Mars, op 1,52 AU van de Zon, ligt er net buiten.

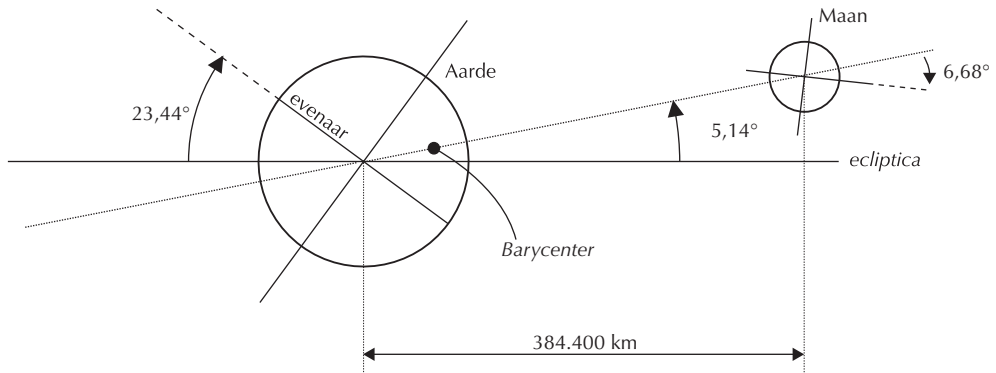
1.1.3 Het Aarde-maansysteem

De Aarde heeft één natuurlijke maan. Opmerkelijk is dat de maan relatief groot is ten opzichte van haar gastplaneet. Daarom spreekt men ook vaak van het **Aarde-maansysteem**. De diameter van de maan (1.738 km) is ongeveer 1/4 van de diameter van de Aarde; de massa van de maan is slechts 1/81 van de massa van de Aarde. De gemiddelde afstand tussen de maan en de Aarde is 384.400 km. De maan en de

Aarde roteren rond een gemeenschappelijk massamiddelpunt (ook wel Barycentrum genoemd) dat zo'n 1.700 km onder het aardoppervlak ligt. De maan heeft een relatief lage dichtheid ($3,34 \text{ g/cm}^3$) ten opzichte van die van de aardse planeten. De metaalkern van de maan is zeer klein (150 tot 250 km straal) en neemt slechts 2 tot 5% van haar volume in.

Het omloopvlak van de maan rond de Aarde is ongeveer $5,14^\circ$ gekanteld ten opzichte van het omloopvlak van de Aarde rond de Zon (figuur 1.2). Samen met de gekantelde aardas (zie § 1.1.4) zorgt dit ervoor dat er zich geen zonsverduistering voordoet bij elke nieuwe maan en geen maansverduistering bij elke volle maan. De obliquiteit van de rotatieas van de maan is ongeveer $6,68^\circ$. De omlooptijd van de maan is 27,32 dagen, een siderische maand. Dit is ook de rotatiesnelheid van de maan om haar eigen as. We hebben dan ook te maken met een gesynchroniseerde rotatie, een gevolg van de getijdenkrachten van de Aarde op de maan. Uiteindelijk betekent dit dat we vanop Aarde steeds dezelfde kant van de maan zien. Op Aarde is de tijd tussen twee nieuwe manen 29,53 dagen, een synodische maand. De onderlinge getijdenkrachten hebben ook tot gevolg dat de rotatiesnelheid van de Aarde gestaag afneemt met een snelheid van ongeveer 17 seconden per miljoen jaar (of 0,0017 seconden per eeuw) en dat de maan zich steeds verder verwijdt van de Aarde met een snelheid van ongeveer 3,8 cm/jaar. We leven dan ook in een uniek tijdperk in de geschiedenis van ons zonnestelsel waarin totale zonsverduisteringen kunnen voorkomen, net omdat de schijnbare grootte van de maan nu zo goed als gelijk is aan de schijnbare grootte van de Zon. Uit studies van ritmische sedimenten van neoproterozoïsche ouderdom (zie figuur 2.5) kan berekend worden dat zo'n 620 miljoen jaar geleden de maan ongeveer 3,5% dichter bij de Aarde stond; dit zou een gemiddelde verwijderingssnelheid van ongeveer 2,2 cm/jaar opleveren voor de laatste 620 miljoen jaar. Paleoproterozoïsche (zie figuur 2.5) '*banded iron formations*' (zie hoofdstuk 7 – § 7.2.7) geven aan dat zo'n 2.450 miljoen jaar geleden de maan ongeveer 10% dichter bij de Aarde stond; dit betekent een gemiddelde verwijderingssnelheid van 1,2 cm/jaar tijdens het proterozoïcum. Deze studies wijzen erop dat de verwijderingssnelheid door de aardse geschiedenis heen gestaag is toegenomen.

De maan speelt een belangrijke rol in het verhaal van de Aarde. De maan is niet alleen verantwoordelijk voor de getijden (zie hoofdstuk 7 – § 7.3.8) en voor het verlengen van de aardse dagen, maar de maan is uiteindelijk ook verantwoordelijk voor de stabilisering van de tilt van de aardas (zie hoofdstuk 12 – § 12.3.1).



FIGUUR 1.2. Omloopkarakteristieken van het Aarde-maansysteem; de omloopbaan van de maan is lichtjes gekanteld ten opzichte van de omloopbaan van de aarde, de ecliptica.

Aardbevingen en de rotatie van de Aarde

Berekeningen wijzen uit dat ten gevolge van de zware aardbeving (M_w 9,1) die Sumatra trof op 26 december 2004 een aardse dag 2,68 microseconden (of 0,00000268 seconden) korter is geworden; ten gevolge van de zware aardbeving (M_w 8,8) die Chili trof op 27 februari 2010, verkorte een aardse dag nog eens 1,26 microseconden. Totaal onwaarneembaar, maar toch... na duizend jaar betekent dat een schrikkelseconde.

Dit heeft alles te maken met het fysische principe van behoud van het impulsmoment. Van dit principe maakt de kunstschaatser handig gebruik bij het uitvoeren van een pirouette. Met gespreide armen en/of benen draait de kunstschaatser traag om zijn as; brengt hij zijn armen en/of benen tegen zijn lichaam, dan draait hij steeds sneller om zijn as. Eigenlijk heeft de kunstschaatser massa (zijn armen en/of benen) dichterbij de rotatieas gebracht; door behoud van het impulsmoment leidt dat tot een toename van de rotatiesnelheid.

Bij heel zware aardbevingen doet er zich ook een massaherverdeling voor ten opzichte van de rotatieas van de Aarde. Delen van de aardkorst worden immer horizontaal en/of verticaal verplaatst (zie hoofdstuk 8 – § 8.3.1). Zowel in Sumatra als Chili werd aardmassa relatief dieper de Aarde ingeduwd door het proces van subductie (zie hoofdstuk 4 – § 4.2.2), dus dichterbij de aardse rotatieas. Deze massaherverdeling doet – net als bij de kunstschaatser – de rotatiesnelheid toenemen, waardoor uiteindelijk een aardse dag een beetje korter wordt. Natuurlijk zijn deze effecten verwaarloosbaar in vergelijking met bijvoorbeeld de invloed van de getijdenwerking op de aardse rotatiesnelheid (zie § 1.1.3).

1.1.4 De beweging van de Aarde

De omloopbaan van de Aarde rond de Zon, de **ecliptica**, ligt $7,25^\circ$ uit het evenaarsvlak van de Zon. De Aarde doorloopt een elliptische baan rond de Zon, zoals gesteld in de eerste wet van Kepler. Deze omloopbaan is echter bijna cirkelvorming. Het **aphelium**, het punt in de elliptische baan dat het verst verwijderd is van de Zon, ligt op 1,017 AU, terwijl het **perihelium**, het punt in de elliptische baan dat het dichtst bij de Zon gelegen is, op 0,98 AU ligt, nog netjes binnen de ‘bewoonbare zone’ rond de Zon (zie § 1.1.2). De **excentriciteit** van de omloopbaan van de Aarde rond de Zon bedraagt momenteel 0,017. In het perihelium ontvangt de Aarde bijna 7% meer zonne-energie dan in het aphelium. De Aarde gaat door het perihelium op 3 januari. In combinatie met de obliquiteit betekent dit dat het zuidelijk halfrond het dichtst bij de Zon staat tijdens de zomer, in tegenstelling tot het noordelijk halfrond, dat tijdens de winter het dichtst bij de Zon staat. Dit maakt dat de seizoensvariatie meer uitgesproken is op het zuidelijk halfrond.

De wetten van Kepler

De Duitse astronoom Johannes Kepler (1571-1630) legde de planeetbewegingen vast in drie wetten. De **eerste wet** zegt dat een planeet een elliptische baan doorloopt rond de Zon, waarbij de Zon zich in een van de brandpunten van de ellips bevindt. De **tweede wet** stelt dat de omloopsnelheid van de planeet verandert, zodat in gelijke tijdsintervallen de voerstraal (verbindingslijn tussen planeet en Zon) gelijke oppervlakken van de omloopellips beschrijft. De **derde wet** stelt dat het kwadraat van de omlooptijd evenredig is met de derde macht van de gemiddelde afstand tot de Zon. Planeten verder van de Zon zullen dan ook langere omlooptijden hebben.

De omlooptijd van de Aarde rond de Zon is 365,25 zonnedagen, een siderisch jaar. De gemiddelde omloopsnelheid van de Aarde is ongeveer 30 km/s. De tweede wet van Kepler – gebaseerd op het behoud van het draaimoment – stelt dat de omloopsnelheid in het perihelium hoger is dan in het aphelium.

De rotatieas van de Aarde is $23,44^\circ$ gekanteld ten opzichte van de ecliptica (figuur 1.2). We noemen dit de **obliquiteit**. Deze kanteling ligt aan de basis van het bestaan van de seizoenen op Aarde. De Aarde draait rond haar as in 23 uur 56 minuten

en 4,09 seconden, een siderische dag. De rotatiesnelheid aan de evenaar is ongeveer 465 m/s (of bijna 1.700 km/u). Een zonnedag – de rotatietijd gezien vanop Aarde – is echter iets langer, namelijk 24 uur, omdat de Aarde intussen een extra stukje heeft afgelegd in haar omloop rond de Zon.

Maar er zit variatie op deze bewegingen. Bovendien blijken deze variaties een bijna-periodisch patroon te vertonen. We kennen deze variaties als de **Milankovićcycli**, naar de Servische geofysicus Milutin Milanković (1879-1958) die deze cyclische variaties in verband bracht met variaties in het aardse klimaat en in het bijzonder met de ijstijden in het pleistoceen (zie hoofdstuk 10 – § 10.2.1). Zo varieert de **excentriciteit** van de omloopbaan tussen 0,005 en 0,058 in een cyclus van ongeveer 100.000 jaar. De **obliquiteit** varieert in een cyclus van ongeveer 41.000 jaar tussen een kantelhoek van 22,1° en 24,5°. De obliquiteit neemt voor het ogenblik af en zal hoogstwaarschijnlijk binnen zo'n 8.000 jaar het minimum bereiken. Uiteindelijk draait de Aarde als een draaitol in haar omloopbaan rond de Zon. Dit noemen we de **precessie** van de aardas. De periode van de precessie is ongeveer 26.000 jaar. Door de precessie verandert de hemelpool en dus ook de ster die we nu de Poolster noemen. Uiteindelijk is er ook variatie op de **inclinatie** van de ecliptica met een periodiciteit van ongeveer 100.000 jaar. Deze cyclische variaties in beweging en oriëntatie hebben een sterke invloed op de intensiteit en op de verdeling van de zonne-instraling op Aarde. De link met klimaatvariaties ligt dan ook voor de hand (zie hoofdstuk 8 – § 8.2.3).

Hoe ontstaat een aardse planeet?

Planeten ontstaan uit de circumstellaire schijven die zich rond een jonge ster ontwikkelen. Twee processen spelen een belangrijke rol in de vorming van een planeet: condensatie en accretie.

Condensatie doet zich al voor bij de vorming zelf van de circumstellaire schijf. Door het afkoelen van de gassen in de zonnenevel worden stofdeeltjes aangemaakt. Doordat de temperatuur in de zonnenevel afneemt wanneer de afstand tot de Zon groter wordt, veroorzaakt dit condensatieproces al een samenstellingszonering in de circumstellaire schijf. In het binnenste deel van de schijf zal de condensatie voornamelijk aanleiding geven tot het aanmaken van silicaat-, oxide- en metaalrijke stofdeeltjes, rijk aan onder meer zuurstof, silicium, magnesium, ijzer, nikkel, natrium, aluminium en calcium. Deze zware elementen vormen slechts 2% van de totale massa van de schijf (en van het heelal). Deze binnenste zone is bovendien relatief arm aan gassen, doordat deze al vroeg in de ontstaansgeschiedenis van het

zonnestelsel door de stralingsdruk van de jonge Zon naar buiten worden weggeblazen. Het condensatieproces resulteert dan ook in relatief weinig materiaal om planeten te vormen. Verder dan 5 AU van de Zon is het echter zo koel dat ook de gasvormige componenten condenseren, waardoor ijsdeeltjes gevormd worden, rijk aan onder meer koolstof, stikstof, zuurstof, neon, zwavel en argon. Hierdoor is er veel meer stof in de buitenste delen van het zonnestelsel. Dit condensatieproces ligt aan de basis van de typische opbouw van het zonnestelsel met kleine aardse binnenplaneten en gas- en ijsreuzen verder weg van de Zon.

Accretie is verantwoordelijk voor de vorming van aardse planeten. In het vroege stadium van de accretie klitten stofdeeltjes elektrostatich aaneen tot kleine (centimetergrote) brokken. Dit klonterproces zal uiteindelijk leiden tot planetesimalen met een straal tussen 100 en 1.000 m. Computermodellen wijzen uit dat dit zeer snel kan gebeuren, in minder dan 1 jaar na condensatie. Nu begint een nieuwe fase in het accretieproces, waarbij zwaartekracht een belangrijke rol zal spelen. Planetesimalen – embryonale planeetjes – botsen met elkaar en groeien gestaag aan. In een tijdspanne van 10.000 tot 100.000 jaar kunnen zo aardse protoplaneten ontstaan met een straal van 100 tot 1.000 km. Deze protoplaneten ‘kannibaliseren’ hun omgeving door het ‘schoonvegen’ van alle materiaal in hun baan. De laatste fase van de planeetontwikkeling is de meest dramatische. In een periode van tientallen miljoenen jaren doen er zich catastrofale botsingen en versmeltingen voor tussen protoplaneten. De steeds groeiende hemellichamen ondergaan gigantische inslagen. De scheefstelling van de rotatieassen van verschillende planeten is hiervan nog een stille getuige. Na zo’n 100 miljoen jaar heeft een aardse planeet heel de omgeving van zijn omloopbaan schoongeveegd en is het groeiproces zo goed als voltooid (zie hoofdstuk 9 – § 9.1).

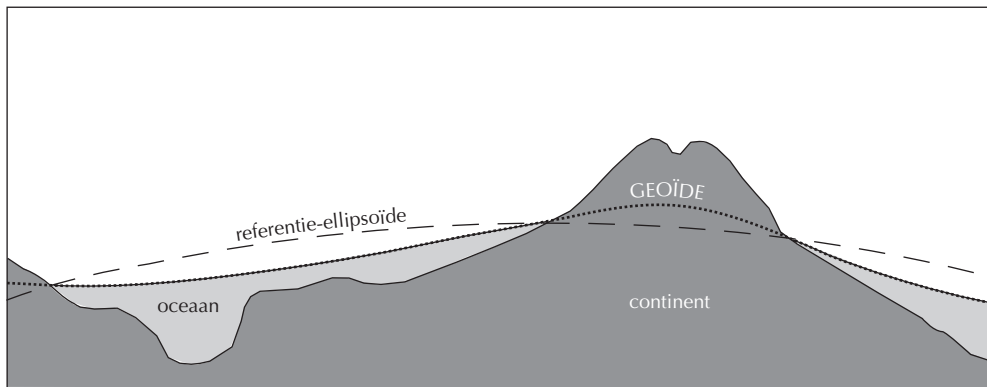
1.2 De Aarde vanuit de ruimte

1.2.1 De vorm van de Aarde

De Aarde is een verre van perfecte bol. De Aarde kan beter omschreven worden als een afgeplatte sferoïde. Deze geïdealiseerde vorm noemen we de omwentelingsellipsoïde. De gemiddelde straal van de Aarde bedraagt 6.371 km. De straal aan de polen is 14,2 km korter dan gemiddeld (6.356,8 km), terwijl de straal aan de evenaar 7,1 km langer is dan gemiddeld (6.378,1 km). De equatoriale straal is dus 21,3 km langer dan de polaire straal. De Aarde vertoont dan ook een ‘zwellings’ rond de evenaar. Dit heeft alles te maken met de rotatie van de Aarde. We moeten de Aarde immers zien als een

bol opgebouwd uit een stroperige vloeistof die onder invloed van een snelle rotatie rond zijn as ‘uitzet’ in het vlak loodrecht op de rotatieas.

De omtrek van de Aarde is ongeveer 40.000 km: 40.075,02 km volgens de evenaar, 40.007,86 km volgens de meridiaan. Deze meridionale omtrek ligt aan de basis van de lengtemaat in het metrische systeem. De eenheid voor lengte, **meter**, is immers in 1791 door de Académie des Sciences de France vastgelegd als 1/10.000.000 van de afstand tussen de evenaar en de Noordpool volgens de meridiaan die door Parijs loopt. Volgens deze definitie zou de meridionale omtrek dus exact 40.000 km moeten zijn.



FIGUUR 1.3. Het aardoppervlak: verschil tussen het reliëf (topografie & bathymetrie), de geoid, en de referentie-ellipsoïde.

In de geodesie, de wetenschap die zich bezighoudt met de afmetingen van de aarde, wordt de omwentelingsellipsoïde de **referentie-ellipsoïde** genoemd (figuur 1.3). Deze referentie-ellipsoïde zou theoretisch samenvallen met het gemiddelde globale zeeniveau. Het is echter een wiskundig afgeleide benadering van de ware vorm van de Aarde, voornamelijk toegepast in de cartografie of voor geodetische referentiesystemen gebruikt in gps (bijvoorbeeld WGS84). Deze referentie-ellipsoïde zou moeten samenvallen met het equipotentiaaloppervlak van de zwaartekracht (het vlak waarop de zwaartekracht loodrecht staat). Dit equipotentiaaloppervlak is de **geoid** (figuur 1.3). Indien de Aarde volledig bedekt zou zijn met oceanen, dan zou de geoid samenvallen met het globale gemiddelde zeeoppervlak. Maar deze geoid is onregelmatig en wijkt af van de referentie-ellipsoïde. Deze afwijking varieert tussen +85 m en -106 m. In de grootschalige geoidestructuur vallen twee culminaties op, die elkaars antipoden zijn: enerzijds het ‘Atlantisch-Afrikaanse Hoog’ (van IJsland in de noordelijke

Atlantische Oceaan tot de Kerguelenarchipel in de zuidelijke Indische Oceaan), en anderzijds het ‘Centraal-Pacifische Hoog’ (van Hawaï tot Nieuw-Zeeland). Opmerkelijk is de overeenkomst tussen deze culminaties en het voorkomen van de gloeipunten (zie hoofdstuk 3 – § 3.3.2). Een verklaring voor deze grootschalige geïdestructuur is niet alleen terug te vinden diep in de mantel (zie hoofdstuk 7 – § 7.1.3), maar ook diep in de tijd (zie hoofdstuk 8 – § 8.2.2). Het fysische **aardoppervlak** zelf is zeer geaccidenteerd en wijkt sterk af van de geïde. Het fysische aardoppervlak varieert van + 8.848 m (Mount Everest) tot -10.911 m (Marianentrog).

Waarom is een planeet bolvormig?

Dit heeft alles te maken met de zwaartekracht. Op een bol is de afstand tot het middelpunt overal gelijk. Dit betekent dat ook de zwaartekracht op die bol overal even groot is. Dit noemen we het **equipotentiaaloppervlak** van de zwaartekracht.

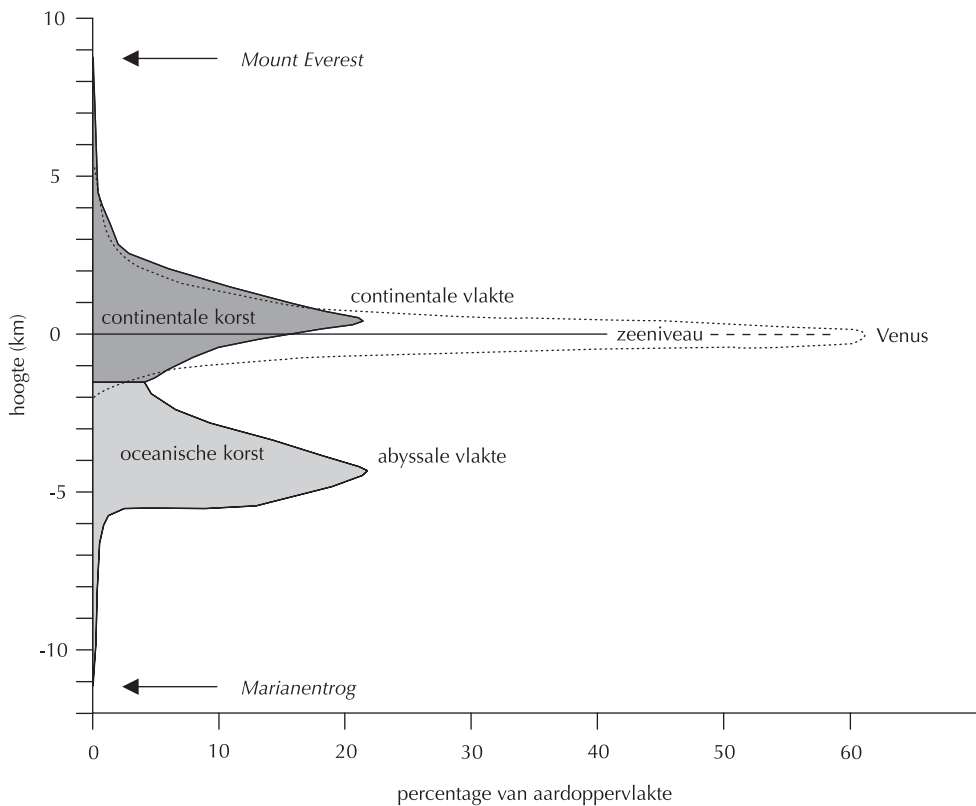
Planetoïden kunnen de meest grillige vormen hebben. Maar wanneer in het accretieproces de omvang van deze planetesimalen toeneemt, neemt ook de zwaartekracht toe. Dit leidt niet alleen tot een verdichting maar ook tot een opwarming binnenin de protoplaneet (zie hoofdstuk 6 – § 6.1.2). Hierdoor wordt het gesteente in de protoplaneet als het ware ‘vloeibaar’. Op geologische tijdschalen gedraagt het gesteente zich dan ook als siroop. Dit intern vloeigedrag van de gesteenten onder invloed van de zwaartekracht zal er uiteindelijk toe leiden dat de planeet bolvormig wordt.

De catastrofale planetaire botsingen in de laatste fase van de planeetontwikkeling helpen hierbij nog een handje. Door deze botsingen smelt de protoplaneet immers volledig en verandert hij in een ‘magmaocean’, waarin de gravitaire vloeï natuurlijk nog veel gemakkelijker verloopt.

1.2.2 Het aardoppervlak

Denken we even het water van de oceanen weg, dan krijgen we een mooi beeld van het reliëf van het aardoppervlak. In de vergelijking met de naburige planeten en de maan (zie § 1.1.1) is het al opgevallen dat het aardoppervlak slechts beperkt getekend is door inslagkraters. Dit doet vermoeden dat het uitzicht van het aardoppervlak een zeer jong fenomeen is. Bovendien valt onmiddellijk een patroon op van langgerekte bergketens, zowel langs de continentranden als in het midden van de zeevloer. Op

de continenten vinden we naast de bergketens en hoogplateaus vooral uitgestrekte vlakten terug. Ook de zeevloer wordt gekenmerkt door uitgestrekte vlakten naast de oceaandruggen, oceanische plateaus en de diepzeevallen. Deze karakteristieke hoogteverdeling van het aardoppervlak komt ook duidelijk naar voren als we de hoogteverdeling van het aardoppervlak procentueel uitzetten als een zogenaamde **hypsometrische curve** (figuur 1.4). Dan wordt overduidelijk dat het hooggebergte en de diepzeevallen slechts een klein deel uitmaken van het aardse reliëf. Het grootste deel van de continenten bestaat uit de **continentale vlakten** met een hoogte van minder dan 1.000 m boven zeeniveau. Het grootste deel van de zeevloer bestaat uit de **abyssale vlakten** gelegen tussen 2.500 en 4.500 m onder het zeeniveau.



FIGUUR 1.4. Hypsometrische curve van de Aarde: procentuele bimodale hoogteverdeling van het aardoppervlak ten opzichte van het zeeniveau; verdeling tussen continentale en oceanische korst. Ter vergelijking: de unimodale hoogteverdeling van het Venusoppervlak ten opzichte van de gemiddelde straal van Venus.

Dit 'bimodale' patroon van de hoogteverdeling – gekenmerkt door twee dominante hoogten – is atypisch vergeleken met onze buurplaneten. Zo is de hoogteverdeling van het Venusoppervlak unimodaal (figuur 1.4). 84% van het Venusoppervlak bestaat uit vulkanische vlaktes. Zestig procent van het Venusoppervlak ligt in een bereik van 500 m ten opzichte van de gemiddelde straal van Venus (= equivalent van het aardse zeeniveau).

Eratosthenes en de omtrek van de Aarde

De Griekse geleerde **Eratosthenes** (276-194 voor Christus) had gehoord dat bij de zonnende in de antieke Egyptische stad Syene (het huidige Aswan) op de middag geen schaduw meer te bespeuren viel. Dit betekent dat de zonnestralen dan loodrecht op het aardoppervlak vallen. Aswan ligt immers pal op de Kreeftskeerkring, waar de Zon in het zenit staat op 21 juni. Maar in Alexandrië, zo'n 800 kilometer ten noorden van Aswan, valt er nog altijd een schaduw te bespeuren op de middag van 21 juni. In 240 voor Christus bedacht Eratosthenes dat dit enkel mogelijk was als het aardoppervlak gekromd was. En zodra hij daarvan overtuigd was, was het een koud kunstje om de volledige omtrek van de Aarde te berekenen. In Alexandrië kon hij immers, op basis van de lengte van de schaduw en de lengte van het object (bijvoorbeeld een stok) dat de schaduw veroorzaakte, de hoek bepalen waarmee de zonnestralen invallen. Hij vond een hoek van ongeveer 7°, 1/50 van een volledige cirkelomtrek (360°). Omdat de Zon zo ver weg ligt van de Aarde, vallen alle zonnestralen overal op Aarde parallel in. Hij liet dan ook de afstand tussen Syene en Alexandrië afpassen. Het resultaat – ongeveer 5.000 Egyptische stadia (1 stadium = ~157,5 m) – kon dan ook gelijkgesteld worden aan 1/50 van de omtrek van de Aarde. Uiteindelijk verkreeg Eratosthenes een omtrek van ongeveer 39.690 km, een resultaat met een verbluffende nauwkeurigheid (minder dan 1% fout).

70,8% van het aardoppervlak is bedekt met water. Slechts 29,2% is land. Een belangrijk deel van de continenten, het **continentaal plat**, staat onder water. Het continentaal plat vormt het relatief ondiepe deel van de oceanen tot ongeveer 500 m onder het huidige zeeniveau. De overgang van het continentaal plat naar de abyssale vlakten noemen we de **continentale helling**. Deze overbrugt een hoogteverschil van meer dan 2.000 meter. Onderaan de continentale helling neemt de helling lichtjes af en gaat zij over in de **continentale verheffing** alvorens over te gaan in de abyssale vlakte.

1.3 De opbouw van de Aarde

1.3.1 De chemische samenstelling van de Aarde

Op basis van de gravitatiewet van Newton kan de massa van de Aarde worden berekend. Deze bedraagt ongeveer $5,98 \cdot 10^{24}$ kg. Rekening houdend met het volume van de Aarde, ongeveer $1,08 \cdot 10^{12}$ km³, is de gemiddelde dichtheid van de Aarde $5,51$ g/cm³.

Chemisch gezien is de Aarde voornamelijk samengesteld uit zuurstof (31%), ijzer (30%), silicium (17%), magnesium (16%), nikkel (1,5%), calcium (1,9%), aluminium (1,4%). Alle overige chemische elementen maken slechts 1,2% van de aardse massa uit. Het zal dan ook niet verbazen dat de meest voorkomende mineralen **silicaten** zijn, gebaseerd op **silica** of siliciumdioxide (SiO₂).

Natuurlijk is de gemiddelde samenstelling van de Aarde een theoretische schatting, gebaseerd op het model van de zogenaamde **chondrietische Aarde**. Dit model gaat ervan uit dat de gemiddelde samenstelling van de Aarde gelijk is aan die van koolstofchondrieten (C-type chondrieten). Een **chondriet** is een type meteoriet dat rijk is aan silicaten. Chondrieten dragen geen sporen van smelt of differentiatie ten gevolge van hoge druk of temperatuur. Vooral de koolstofchondrieten hebben nooit een opwarming boven de 200°C ondergaan. Er wordt dan ook verondersteld dat deze chondrieten brokstukken zijn van het ruimtestof waaruit de aardse planeten door accretie ontstaan zijn. Dit wordt bevestigd door de ouderdomsbepaling van meteorieten, die clustert tussen 4,56 en 4,53 miljard jaar. Deze oorspronkelijke asteroïden, waarvan deze chondrieten afkomstig zijn, hebben echter nooit de omvang bereikt die aanleiding zou geven tot smelt en differentiatie. Hun samenstelling benadert dan ook, op de gasvormige elementen na, de oorspronkelijke samenstelling van het zonnestelsel.

Opvallend is dat de gemiddelde samenstelling van de Aarde sterk verschilt van de kosmische abundanties aan chemische elementen. Het heelal, de Zon en het hele zonnestelsel bestaan immers voor 72% uit waterstof (H₂) en voor 26% uit helium (He). Het bijzondere condensatie- en accretieproces dat geleid heeft tot de aardse binnenplaneten, is in belangrijke mate verantwoordelijk voor deze afwijking.

1.3.2 De interne structuur van de Aarde

Zoals de andere aardse planeten kent de Aarde een gelaagde opbouw (zie hoofdstuk 7 – § 7.1.1). Deze is het gevolg van een chemisch differentiatieproces bij het ontstaan van de planeet, waarbij zwaardere elementen naar de kern wegzakten (zie hoofdstuk 6 – § 6.1.3) en lichtere elementen naar de periferie migreerden.

De **atmosfeer** is de buitenste laag van de Aarde waarin de lichte, gasvormige elementen zijn geconcentreerd (zie hoofdstuk 7 – § 7.2). De atmosfeer bestaat voor 78% uit stikstof (N_2) en voor 21% uit zuurstof (O_2). De overige 1% is voornamelijk opgebouwd uit argon (Ar), koolstofdioxide (CO_2), neon (Ne), helium (He), methaan (CH_4), lachgas (N_2O), ozon (O_3) en waterdamp (H_2O). Op zeeniveau heeft de atmosfeer een dichtheid van ongeveer $0,0012 \text{ g/cm}^3$. De atmosferische druk op zeeniveau is 101,3 kPa. Zowel de dichtheid als de luchtdruk neemt af met de hoogte. De gemiddelde temperatuur van de atmosfeer aan het aardoppervlak is 15°C . De dikte van de atmosfeer is moeilijk te bepalen, omdat de atmosfeer steeds dunner wordt en geleidelijk overgaat in de ruimte. Arbitrair wordt de bovenzijde van de atmosfeer wel eens gelegd op 100 km hoogte, de zogenaamde **Kármánlijn**, al beschouwt de Amerikaanse luchtmacht je al als astronaut wanneer je boven een hoogte van 80 km hebt gevlogen.

De **korst** is de vaste maar uiterst dunne buitenschil van de Aarde. Zij vormt slechts 1% van het volume en amper 0,4% van de massa van de Aarde. Hier maken we onderscheid tussen de oceanische en de continentale korst. De **oceanische korst** is 7 tot 10 km dik en heeft een basaltische samenstelling. De dichtheid is ongeveer $2,9 \text{ g/cm}^3$. De **continentale korst** heeft eerder een granietische samenstelling. De gemiddelde dichtheid is ongeveer $2,7 \text{ g/cm}^3$. De dikte is gemiddeld 35 tot 40 km maar varieert tussen 20 en 70 km. De temperatuur in de korst neemt toe met de diepte. De geothermische gradiënt in de korst ligt doorgaans tussen 15°C/km tot 50°C/km . Aan de basis van de korst kan de temperatuur oplopen tot 500 tot 1.000°C . De omgevingsdruk neemt gemiddeld met $26,5 \text{ MPa/km}$ toe. De grens met de onderliggende mantel wordt de **Mohorovičićdiscontinuïteit**, of kortweg **Moho**, genoemd. Het was de Kroatische seismoloog Andrija Mohorovičić (1857-1936) die deze seismische discontinuïteit in 1909 identificeerde als het vlak waar aardbevingsgolven plots in snelheid toenemen (zie hoofdstuk 7 – § 7.1.1).

Vergelijken we nu de gemiddelde dichtheid van de aardkorst ($2,7$ tot $2,9 \text{ g/cm}^3$) met de gemiddelde dichtheid van de Aarde zelf ($5,51 \text{ g/cm}^3$), dan wordt het duidelijk dat de diepere lagen in de Aarde veel hogere dichtheden moeten hebben.

De **mantel** vormt de viskeuze – ‘vloeibaar als stroop’ – laag tussen korst en kern. De mantel strekt zich uit tot een diepte van 2.890 km. Hij maakt dan ook ongeveer 83% van het volume van de Aarde uit en ongeveer 68% van de massa. Net als de korst is de mantel voornamelijk opgebouwd uit silicaatgesteenten. De gemiddelde dichtheid van de mantel varieert van 3,3 g/cm³ net onder de korst tot 5,6 g/cm³ net boven de kern. De temperatuur varieert tussen 500 tot 1.000°C net onder de korst tot meer dan 4.000°C aan de kern-mantelgrens. Maar de gigantische omgevingsdruk, oplopend tot ongeveer 140 GPa aan de kern-mantelgrens, verhindert dat het gesteente bij deze temperaturen smelt.

De **kern** strekt zich uit van 2.890 km tot 6.371 km diepte en vormt 31% van de massa van de Aarde. In de kern maken we nog onderscheid tussen de vloeibare buitenkern en de vaste binnenkern. De **buitenbinnenkern**, tussen 2.890 en 5.155 km diepte (15% van het volume van de Aarde), bestaat uit een vloeibare ijzer-nikkellegering met een dichtheid van 10 tot 12 g/cm³. De **binnenbinnenkern**, tussen 5.155 km en 6.371 km diepte (slechts 1% van het volume van de Aarde), heeft een straal van 1.200 km en bestaat uit een vaste ijzer-nikkellegering. De dichtheid wordt geschat op 13 g/cm³. De omgevingsdruk loopt verder op tot ongeveer 360 GPa in het centrum van de Aarde, meer dan 3 miljoen keer de luchtdruk aan het aardoppervlak. Temperaturen lopen mogelijk op tot 5.000 tot 6.000°C, ongeveer de temperatuur die heerst op het oppervlak van de Zon. Het bestaan van zowel een vloeibare buitenkern als een vaste binnenkern ligt aan de basis van het magnetische veld van de Aarde, gegenereerd door de **geodynamo** (zie hoofdstuk 7 – § 7.1.4).

What's in a name?

Onze planeet krijgt heel wat namen toebedeeld.

Aarde (Earth, Terre, Erde, Tierra, Terra, أراض, ...) verwijst natuurlijk gewoonweg naar de aarde, grond, bodem onder onze voeten.

De **blauwe planeet** wordt courant gebruikt sinds de fameuze ‘Blue Marble’-foto die op 7 december 1972 door de bemanning van Apollo 17 is genomen.

Moeder Aarde verwijst meer naar de wijze waarop de Aarde in vele culturen beschouwd werd, namelijk als de moedergodin.

In de jaren 1960 ontwikkelde James Lovelock het concept van de ‘levende planeet’. Hij noemde dit concept **Gaia**, naar de Griekse godin van de Aarde (zie hoofdstuk 5).

Dit concept vormde de inspiratie voor wat we nu **Systeem Aarde** noemen. We spreken nu dan ook meer en meer over **Planeet Aarde** om de nadruk te leggen op het feit dat onze planeet meer is dan een dood stuk steen in de ruimte.

Ten slotte spreken we over de **wereld** wanneer we het hebben over de woonplaats van de mens.

1.3.3 De ouderdom van de Aarde

Op basis van radiometrische dateringen (zie hoofdstuk 2 – § 2.3.3) op bestanddelen van meteorieten wordt algemeen aangenomen dat de Aarde niet veel ouder kan zijn dan 4,567 miljard jaar. Het oudst gedateerde materiaal in het zonnestelsel zijn calcium-aluminiumrijke insluitsels uit de Allendemeteoriet (ingeslagen op Aarde in Mexico op 8 februari 1969). Zij geven een ouderdom van ongeveer 4,567 miljard jaar ($4.567,2 \pm 0,6$ miljoen jaar). Recente radiometrische dateringen van calcium-aluminiumrijke insluitsels uit de meteoriet NWA 2364 (gevonden in Noordwest-Afrika in 2004) geven een ouderdom van ongeveer 4,568 miljard jaar ($4.568,2 \pm 0,4$ miljoen jaar), ongeveer een miljoen jaar ouder dan de insluitsels uit de Allendemeteoriet. Het oudst gekende materiaal van aardse oorsprong is een zirkoonkristal uit een metamorf conglomeraat uit het Australische craton (Jack Hills). Het conglomeraat zelf is waarschijnlijk niet veel ouder dan 3 miljard jaar, maar de zirkoon is ongeveer 4,404 miljard jaar oud (4.404 ± 8 miljoen jaar). Het oudst gekende gesteente is de Acasta Gneis uit het Canadese craton. Zirkonen uit deze gneis wijzen op een ouderdom van het oorspronkelijke magmatische gesteente van ongeveer 4,03 miljard jaar (4.031 ± 3 miljoen jaar).

In 2008 is een groensteen – de Nuvvuagittuq Groensteen – ontdekt in het Canadese craton met een ouderdom van 4,28 miljard jaar. Verder onderzoek zal moeten bevestigen of dit nu het oudste stukje korst is op onze planeet.

1.4 Planeet Aarde, portret van een bijzondere planeet

Zelfs al uit deze eerste kennismaking met Planeet Aarde blijkt dat onze blauwe planeet het buitenbeentje is in het zonnestelsel en tot nader order in het hele heelal.

Vergelijk Planeet Aarde met zijn bijna identieke zusterplaneet Venus, en je kan je moeilijk twee zo totaal contrasterende werelden voorstellen.

Elk hemellichaam in ons zonnestelsel heeft zijn eigen verhaal te vertellen. Denk maar aan Mercurius, die in een gigacollisie een groot deel van zijn mantel is kwijtgespeeld. Maar ook de Aarde heeft haar unieke verhaal te vertellen. Dit is een verhaal van een planeet die zich op het juiste moment op een bijzondere plaats in een bijzonder zonnestelsel rond een bijzondere ster bevindt om een uniek 'kosmisch experiment' toe te laten. En dit is ook het verhaal van dit boek.

