

PRAKTISCH PLANEETONDERZOEK
VOOR DE ZATERDAGOGHTEND

Sebastiaan de Vet

Praktisch
planeetonderzoek
voor de zaterdagochtend

Geïllustreerd door
Femke van Heerikhuizen

Lebowski Publishers, Amsterdam 2016

© Sebastiaan de Vet, 2016

© Lebowski Publishers, Amsterdam 2016

© Illustraties: Femke van Heerikhuizen, 2016

Omslagontwerp: Pankra

Omslagbeeld: Mars, samengesteld uit 102 foto's van de Viking Orbiter. © NASA | USGS

Auteursfoto: Marthe Hennink

Typografie: ZetSpiegel, Best

ISBN 978 90 488 2976 7

ISBN 978 90 488 2977 4 (e-book)

NUR 400

OVERAMSTEL

uitgevers

Lebowski Publishers is een imprint van Overamstel uitgevers bv

Alle rechten voorbehouden.

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



‘Astronomy concerns itself with the whole of the visible universe, of which our earth forms but a relatively insignificant part; while Geology deals with that earth regarded as an individual. Astronomy is the oldest of the sciences, while Geology is one of the newest. But the two sciences have this in common, that to both are granted a magnificence of outlook, and an immensity of grasp denied to all the rest.’

– Charles Lapworth, 1903

Inhoud

Introductie	9
1. Mercurius en de Hortusbrug	19
Experiment: 's Gravesande in je gereedschapskist	38
2. Dreiging uit de ruimte	42
Experiment: <i>Soil Shaker</i>	61
3. Spelen met steen en licht	66
Experiment: Plakbandmondriaans	83
4. Low-budget planeetexpedities	87
Experiment: Magma in een mok	107
5. Waaiend in de wind	114
Experiment: Vacuümfietspomp	133
6. De aantrekkingskracht van bollen	140
Experiment: Ruimteweegschaal	161
7. Planetenjagers op de Zuidpool	166
Experiment: Luchtdrukaansteker	186

8. Langere werkdagen	194
Experiment: Enceladus espresso	214
9. Vieze sneeuwballen en ijsdweren	219
Experiment: IJzige Plutopatronen	240
10. Planetair pandemonium	244
Experiment: Slingerende chaos	258
Dankwoord	265

Introductie

Aan de keukentafel blader ik door een lijvig fotoboek met zwart-witfoto's van het landschap op Mars. De warme dampen stijgen op uit mijn koffiemok en omlijsten mijn fotografische ontdekkingsstocht door het Marslandschap met zoet koffiearoma. Hoewel ik als planeetonderzoeker wel vaker prachtige foto's tegenkom, blijven de patronen zoals die van pijlvormige zandduinen verslavend.

'Wat zijn dat?' klinkt het achter me. Mijn vriendin kijkt over mijn schouder mee terwijl ik door het fotoboek blader. Haar blik blijft hangen bij een foto van zandduinen met donkere vlekken in het poolgebied van Mars.

Tijdens de winter worden ze bedekt met een dun laagje droogijs: bevroren koolstofdioxide dat onder meer bekend is van brandblussers. Doordat de ijslaag enigszins doorzichtig is, verwarmt het zonlicht het donkere duinzand zodat het ijs van onderaf verdampt en druk opbouwt. Als bij het ontkurken van een champagnefles spuit het gas met een portie duinzand vervolgens door de scheuren in het ijs. De zandfonteinen zorgen voor het ontstaan van de merkwaardige vlekkenpatronen die over de met ijs bedekte duinen uitwaaiëren.

Ondanks het feit dat de landschappen op andere planeten soms verdacht veel lijken op de landschappen die we hier op aarde aantreffen, zijn er ook landschappen die daar sterk van afwijken. Zandduinen kennen wij hier natuurlijk ook, maar zandfonteinen zijn

op aarde onbekend. Hoe het komt dat landschappen op elkaar lijken of juist verschillen, dat is het soort vragen dat planeetonderzoekers zich stellen om de ontwikkeling van de planeten in ons zonnestelsel, en dus ook van onze aarde, te ontrafelen.

Dit boek neemt je mee op een ongebruikelijke ontdekkingsreis door het zonnestelsel, waarin vooral *gesteente* het verhaal vertelt. Dat heeft een goede reden. De buitenkant van een planeet is het enige deel dat we met onze eigen ogen kunnen zien. Het landschap is niet uitsluitend een abstract onderdeel van een planeet, het is bij uitstek iets tastbaars op een menselijke schaal. Je hoeft maar een foto van een berg, een ravijn of een zandduin te zien en je kunt proberen je voor te stellen hoe het is om daar als mens op of doorheen te lopen. De tak van wetenschap die al eeuwen door landschappen loopt en bezig is met het bestuderen en het ontrafelen van het reliëf van de aarde, is de *geologie*. Met een beetje kennis van hoe je naar het landschap moet kijken, kun je een fascinerende kant van planeten ontdekken die je bij de eerste aanblik misschien niet had verwacht.

Het landschap speelt dus de hoofdrol in dit boek over planeten. Het is daarom goed om vooraf een eerste idee te hebben van waarom het landschap is gecast voor die hoofdrol. Er zijn namelijk tal van processen die het landschap vormgeven. De fenomenen die het landschap afbreken kun je onderverdelen in drie soorten: verwerings-, erosie- en hellingsprocessen. We spreken over *ververing* als een materiaal zoals gesteente af wordt gebroken door fysische of chemische processen. Een stuk steen kan bijvoorbeeld kapotgeslagen worden door een meteorietinslag, maar ook stukvriezen of oplossen als het langdurig in contact komt met water. Van *erosie* is sprake als er door een bepaald proces materiaal wordt verwijderd, bijvoorbeeld door de kracht van de wind of de stroming van water en ijs. *Hellingsprocessen* tot slot zorgen voor het transport van los materiaal over hellingen onder de invloed van zwaartekracht.

Deze drie soorten landschapsprocessen worden de *externe pro-*

cessen genoemd. Ze bieden tegenwicht aan *inwendige processen* die van binnenuit de aarde het landschap beïnvloeden. Een grote rotsplaneet als de aarde heeft vanbinnen een warmtemotor die ervoor zorgt dat er grootschalige stromingen plaatsvinden waardoor de aardkorst in beweging komt en er bergen, breuken en verzakkingen ontstaan. Tegelijk zorgt de warmte voor de vorming van vloeibaar gesteente dat tijdens vulkaanuitbarstingen over het oppervlak stroomt. Wanneer je naar het hele aardoppervlak kijkt, moet je bedenken dat het een som is van zowel de inwendige als de uitwendige processen. Uit al deze processen kun je proberen af te leiden hoe de aarde zich in de loop van miljarden jaren heeft ontwikkeld.

Net als op aarde is ook het landschap op andere planeten de som van inwendige en uitwendige processen. Het interessante is alleen dat de verhouding daartussen niet hetzelfde hoeft te zijn als op aarde. Wanneer je naar het landschap aan het oppervlak van Mercurius kijkt, naar dat op Mars, of naar de manen om de reuzenplaneten, dan zie je dat ze elk een eigen verhaal te vertellen hebben over miljarden jaren van verandering en ontwikkeling. In het planeetonderzoek proberen we daarom uit het landschap de ontwikkelingsgeschiedenis van de planeten, manen en andere objecten in ons zonnestelsel te ontcijferen.

Je kunt de ontwikkelingsgeschiedenis van planeten onderzoeken door drie ogenschijnlijk eenvoudige vragen over het landschap te stellen. Allereerst moet je je afvragen hoe het landschap van een planeet er op dit moment uitziet. Om die vraag te beantwoorden ben je geïnteresseerd in de samenstelling en verdeling van verschillende soorten gesteente, de verschillen in leeftijd van een landschap en een overzicht van alle processen die nu actief zijn of dat vroeger waarschijnlijk waren.

Op basis van deze ‘inventarisatie’ kun je vervolgens een tweede vraag stellen. Hoe heeft de planeet zich ontwikkeld naar wat we er vandaag de dag van zien? Een planeet kan in de loop van zijn bestaan grote veranderingen hebben doorgemaakt of in miljarden

jaren maar weinig veranderd zijn. Hiervoor onderzoek je hoe de verdeling van soorten gesteente, processen en ouderdommen van landschappen met elkaar samenhangen langs een tijdlijn. Met al die processen en ouderdommen krijg je een gevoel van wat er in de jonge jaren van een planeet speelde, en wat er vandaag misschien anders is dan toen. Als je vervolgens op deze manier meerdere planeten in ons zonnestelsel onderzoekt en ze met elkaar vergelijkt, dan zie je niet alleen prachtige overeenkomsten maar ook verschillen.

De laatste vraag, en veruit de meest complexe van de drie, is dan ook hoe de onderlinge overeenkomsten en verschillen tussen planeten samenhangen met de ontwikkeling van een planeet en wat dit ons vertelt over de mogelijke evolutie van het zonnestelsel. Het zal duidelijk zijn dat planeetonderzoekers een goede gereedschapskist tot hun beschikking moeten hebben voor hun onderzoek om dit soort vragen te kunnen beantwoorden.

De belangrijkste basis voor planeetonderzoek wordt gevormd door de prachtige beelden die door satellieten worden verzameld. In mijn boekenkast staan verschillende fotoboeken met verslavende patronen van duinen en herkenbare structuren van kraters, rivieren en erosieprocessen. Door satellietfoto's te interpreteren beginnen de eerste ideeën te dagen over wat er in buitenaardse landschappen aan processen speelt. Hiervoor is het landschap op aarde een waardevolle bron van inspiratie; sommige buitenaardse landschappen lijken op die van de aarde, zodat je kunt beginnen bij wat je kent. Tegelijkertijd kun je op aarde kenmerken van landschappen opmeten, processen bestuderen en ideeën testen. Met die informatie kun je zien of je het bij het rechte eind had met je eerste impressie van de satellietfoto's. Vergelijkbare landschappen op aarde zijn daarom een waardevol veldlaboratorium voor planeetonderzoek. Soms kan een landschap echter nóg exotischer zijn dan iets wat we op aarde kennen. De zandfontein in de berijpte Marsduinen zijn daar een voorbeeld van. Zodoende moet er soms een vertaalslag gemaakt worden met laboratorium-

experimenten om de gevolgen van verschillen in klimaat, straling, luchtdruk, zwaartekracht of materiaaleigenschappen te onderzoeken. In het planeetonderzoek biedt de combinatie van beeldinterpretatie, veldwerk en experimenteren uitzonderlijke mogelijkheden om de werking van buitenaardse landschappen te begrijpen. Planeetonderzoek is dan ook erg praktisch ingesteld, aangezien veldwerk en experimenteren een belangrijk deel uitmaken van het dagelijks werk van planeetonderzoekers. Het devies is doen. En dat is dan ook het onvolprezen motto van dit boek.

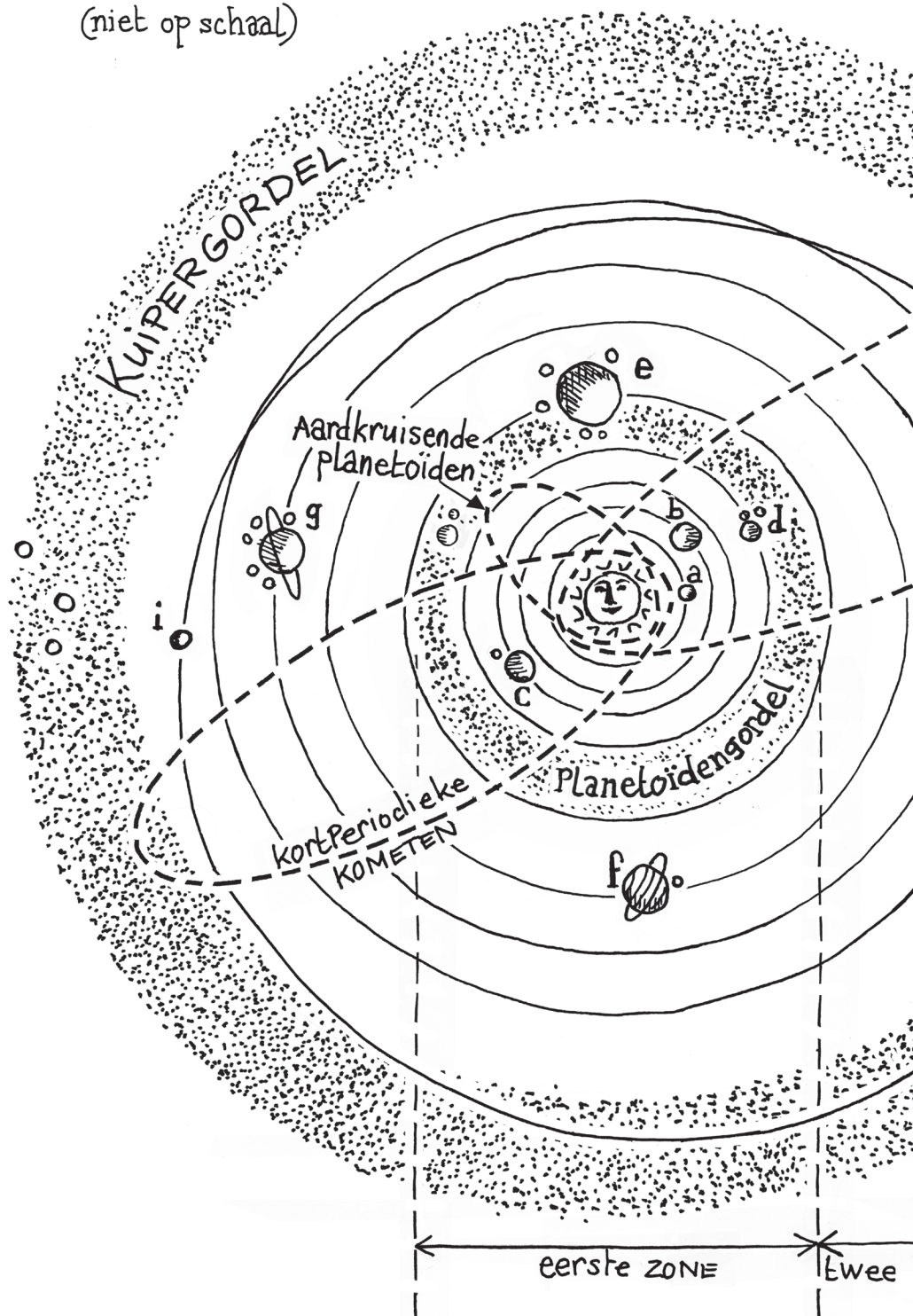
In het eerste deel van dit boek lees je vooral over de ontwikkelingen in het zonnestelsel en de geologie. Je zult ontdekken dat gesteente en het landschap een verhaal vertellen en hoe je dat verhaal kunt 'lezen'. Met die basis lees je vervolgens meer over de overeenkomsten en verschillen tussen verschillende hemellichamen in het zonnestelsel als gevolg van atmosfeer, zwaartekracht, getijdenkrachten en materiaalverschillen. Niet alle objecten in het zonnestelsel zul je in deze verhalen tegenkomen, vooral de meest sprekende voorbeelden. Het laatste hoofdstuk schetst tot slot een totaalplaatje van het zonnestelsel waarbij je de planeten en de ontwikkeling van het zonnestelsel in een grotere context ziet. Naast nieuwe feitjes zul je ontdekken hoe onderzoekers ze op het spoor zijn gekomen. De persoonlijke belevingen van onderzoekers vormen een van de meest intrigerende kanten van het planeetonderzoek. Hoewel planeten op nauwelijks te bevatten afstanden staan, krijgen ze door de persoonlijke dimensie van het planeetonderzoek vaak een amicaal karakter.

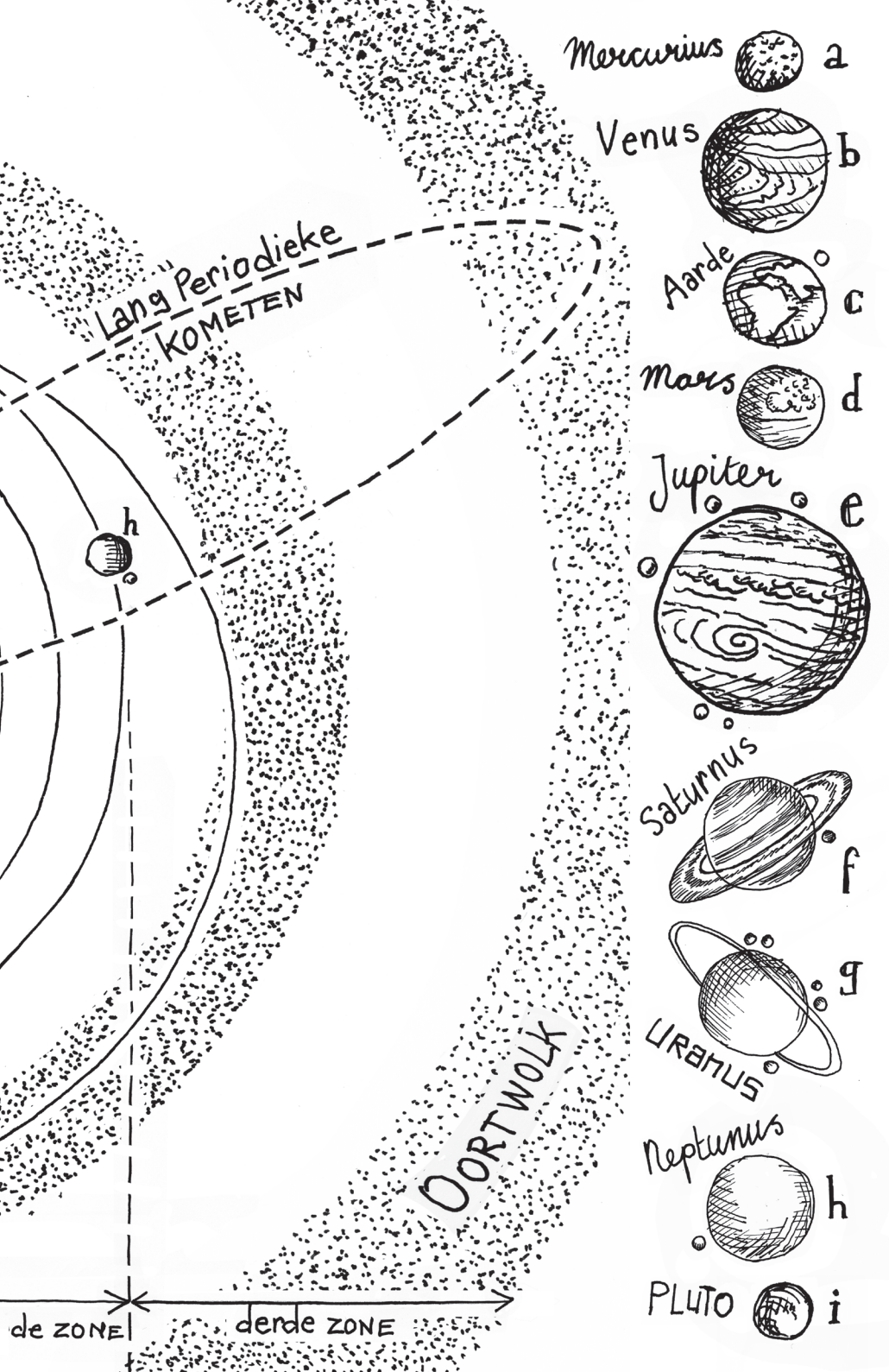
Voor jou als lezer ligt hier bovendien de uitdaging om de praktische kant van planeetonderzoek te ontdekken. Aan het eind van elk hoofdstuk is een experiment te vinden dat je eenvoudig thuis kunt uitvoeren. Experimenten worden sinds jaar en dag door onderzoekers gebruikt om ideeën te testen en ze zijn, zoals gezegd, ook van groot belang voor het planeetonderzoek. Volgens mij moet een experiment je niet afschrikken, maar je uitdagen en aanmoedigen om zelf iets te ontdekken. Daarom vind je in dit boek

vooral experimenten die je zelf kunt doen om wat vertrouwder te raken met fenomenen die raken aan het onderwerp van het betreffende hoofdstuk. Om het uitdagend te houden zijn ze niet allemaal even makkelijk of moeilijk. Met prachtige illustraties word je in de bouwbeschrijving geholpen bij het uitvoeren van die experimenten. Wetenschap beoefen je immers niet uitsluitend in gedachten verzonken met dit boek op de bank of in een treincoupé. *Praktisch planeetonderzoek voor de zaterdagochtend* is in de eerste plaats een tastbare ontdekkingsreis door het zonnestelsel, die dicht bij huis begint.

Het Zonnestelsel

(niet op schaal)





Mercurius a

Venus b

Aarde c

Mars d

Jupiter e

Saturnus f

Uranus g

Neptunus h

PLUTO i

Lang Periodieke
KOMETEN

OORTWOLK

de ZONE

derde ZONE

Mercurius en de Hortusbrug

Het is een waterballet op de bruggen in de hoofdstad. Op de Hortusbrug kijk ik verbaasd naar een tractor die met zijn watertank heen-en-weer over de brug rijdt, terwijl de bestuurder liters grachtenwater over het wegdek spoelt. Ik maak me even zorgen of hij misschien een zonnesteek heeft, maar de reden voor het waterballet wordt me al snel duidelijk. Op hete zomerdagen worden de stalen bruggen in Amsterdam gekoeld omdat ze anders door de opwarming uitzetten en vastlopen. Verderop doet de hitte de lucht boven het wegdek trillen, waardoor ik me iets van dat verhaal kan voorstellen. Landelijk worden vandaag de temperatuurrecords gebroken, het is een van de warmste zomerdagen in de eeuwen. Van achter mijn zonnebril kijk ik naar de zon en ik voel de warmte op mijn hoofd en in mijn nek branden. Het voelt alsof ik op het oppervlak van de planeet Mercurius sta. Op die asgrijze luchtloze planeet straalt de zon immers met een felheid die de oppervlakte bakt op een temperatuur van meer dan vierhonderd graden. Zonder een zuchtje wind lijkt het op de Hortusbrug voor mijn gevoel even net zo heet te zijn.

Onze zon straalt al 4,6 miljard jaar met deze intense warmte. De zon is de dichtstbijzijnde ster vanaf de aarde en ze staat midden in onze kosmische achtertuin. Toch kunnen we veel over onze zon leren door juist dieper het heelal in te kijken. Op een heldere nacht naar de sterrenhemel uren, lijkt in veel opzichten op een wandeling door het bos. Kijk je in het bos om je heen, dan

zie je verschillende soorten bomen, en bomen van verschillende leeftijden. Met het sterrenkijken is het niet veel anders.

Het wintersterrenbeeld Orion illustreert dit verschil in leeftijd en soorten sterren het beste. De linkerschouder van Orion is een rode superreus die Betelgeuse wordt genoemd. De ster zit aan het eind van zijn leven en is inmiddels opgezwollen tot zo'n 1200 keer de doorsnede van de zon. Binnen afzienbare tijd zal deze reus zijn laatste adem uitblazen in een grote explosie die vanaf de aarde zichtbaar zal zijn. Hoelang nog? Dat is giswerk, al zou het zeker nog minstens enkele tienduizenden jaren kunnen duren. Rechts- onder in het sterrenbeeld staat de ster Rigel, een intens stralende ster met een opvallende blauwe kleur die verraadt dat het oppervlak van de ster zeker twee keer heter is dan onze zon. Het meest indrukwekkend is echter de Orionnevel die midden in het sterrenbeeld te vinden is. Op een heldere winteravond kun je deze met het blote oog zien, vaak als een wazig vlekje vanuit je ooghoek, in het onderste deel van de zandlopervorm van het sterrenbeeld. Het licht van deze nevel is ruim 1300 jaren onderweg geweest om de aarde te bereiken. Binnen de nevel ligt een gebied dat een Nederlands tintje heeft. Dat staat bekend als de *Huygens-regio* omdat de Nederlander Christiaan Huygens in 1659 als eerste mens ooit met zijn zelfgebouwde telescoop naar dit deel van de Orionnevel keek. Inmiddels zijn we vele technologisch stappen verder dan de simpele handgeslepen telescopen van Huygens. De legendarische Hubble Ruimtetelescoop tuurt nu al meer dan 25 jaar in de immense diepte van het heelal en stuurt foto's terug die ons voorstellingsvermogen op de proef stellen. In 1993 bekeek de ruimtetelescoop het binnenste deel van de Huygens-regio in de Orionnevel. Wat de wetenschappers aantroffen was ongekend. Stofschijven die twee keer de doorsnede van ons zonnestelsel hebben tekenden zich als duidelijke ringetjes af tegen de kleurrijke gasnevel. De Orionnevel is een kosmische kraamkamer waar gas- sen en stof samenklonteren tot nieuwe sterren en planeten. Het is fascinerend om te bedenken dat er op dit moment in dat wazige

vlekje aan de hemel nieuwe planetenstelsels worden gevormd terwijl wij vanaf het eindproduct van die ontwikkeling zelf naar zo'n gebied staan te turen. De levensloop van sterren zie je dus op een heldere winteravond in één sterrenbeeld samengevat aan de nachtelijke hemel.

De levensloop van een ster kun je in veel opzichten vergelijken met een mensenleven: sterren worden geboren, ze groeien, worden oud en gaan uiteindelijk dood. De zon is bijvoorbeeld nét voorbij haar *midlifecrisis*, en dat betekent dat de planeten in het zonnestelsel minstens net zo oud zijn. De ontwikkeling van de zon én de planeten die eromheen draaien zijn dus onderdeel van een verhaal dat een begin en een einde kent.

Voor ons zonnestelsel begon dat verhaal 4,6 miljard jaar geleden in een gaswolk die veel weg had van de Orionnevel. Vanaf een afstand zag de nevel eruit als een wolk, maar in werkelijkheid bevonden de gasdeeltjes zich nog op grote afstand van elkaar. Om ze te laten samenklonteren is zwaartekracht nodig. Hoe meer gasdeeltjes elkaar aantrekken, hoe zwaarder de opeenhoping wordt die met de nieuw verworven zwaartekracht extra gas kan aantrekken. Deze kosmische kettingreactie heeft alleen een eerste zetje nodig. Die kwam voor ons zonnestelsel in de vorm van een supernova, een van de krachtigste explosies die we in de ruimte kennen. Sterren die groter en zwaarder zijn dan onze zon, zullen aan het eind van hun leven al hun energie in een prachtig felle explosie in de ruimte dumpen. De schokgolf met gas van deze explosie zorgde ervoor dat het ijle gas in de ruimte werd samengedrukt. Toen er na verloop van tijd voldoende gas was opgehoopt, ontstond er een ronddraaiende schijf met daarin de stofdeeltjes en gassen waaruit ons baby-zonnestelsel zich begon te vormen.

Een goed gemengde oersoep was onze stofschijf overigens niet. Dicht bij de zon was het aanzienlijk warmer, waardoor alleen metaal- en steenachtige materialen met een hoog smeltpunt konden samenklonteren. In deze regio ontstonden veel later de rotsplane-

ten Mercurius, Venus, aarde en Mars. Verder weg, op een afstand waar de omgevingstemperatuur ver onder het vriespunt lag, begonnen de reuzenplaneten zich te vormen. De reuzenplaneten zijn overigens vele malen groter geworden dan de rotsplaneten omdat de gassen waaruit ze bestaan veelvuldiger aanwezig waren dan de bestanddelen van de rotsachtige planeten. Andere vluchtige gassen begonnen door de ijskoude temperaturen ook aan te rijpen op ijs- en stofdeeltjes zodat er kilometers grote brokstukken ijs en nog veel grotere ijsdwerfen ontstonden.

Na enkele miljoenen jaren begon de jonge zon feller te stralen en stak er een sterke zonnwind op die de resterende gassen uit de stofschijf wegblijs. Vergelijk het met het knoeien van gemalen koffiebonen en suiker op de keukentafel. Als je het zacht van tafel blaast zie je eerst de lichtere koffiedeeltjes wegwaaien (de gassen) voordat de suiker in beweging komt (het gesteente). Tien miljoen jaar na het begin van de vorming van ons zonnestelsel, doemden de eerste protoplaneten als schimmen op uit de wegwaaiende mist in ons zonnestelsel.

Voor rotsachtige planeten, zoals de aarde, was na het wegwaaien van de stofschijf de enige manier om verder te groeien het botsen met andere steenachtige protoplaneten. En dat gebeurde op grote en gewelddadige schaal in het jonge zonnestelsel. Na het samenklonteren van de eerste kleine steendruppels, de vorming van metersgrote rotsblokken die uitgroeiden tot protoplaneten, zorgden de botsingen tussen die protoplaneten voor de vorming van de hedendaagse rotsplaneten. Bij deze botsingen en inslagen kwam veel warmte vrij die in combinatie met het radioactief verval van elementen in het gesteente de nieuwgevormde rotsplaneten deed smelten. Onder de invloed van hun eigen zwaartekracht werd binnen in de planeten het steen en ijzer van elkaar gescheiden. Dit proces is vergelijkbaar met de splitsing van olie en water in de keuken. Meng de twee door elkaar, wacht een tijdje, en je ziet uiteindelijk de olie boven op het water liggen. Deze splitsing ontstaat doordat olie en water een verschillende dichtheid hebben.

Dichtheid is een materiaaleigenschap die wordt bepaald door de massa van het materiaal in een bepaald volume. Onder invloed van de zwaartekracht zinken de zwaardere metalen tijdens de planeetvorming naar de kern van de planeet terwijl het lichtere gesteente als het ware erbovenop blijft drijven. Metingen van de samenstelling van aards gesteente doen vermoeden dat de kern van de aarde minder dan dertig miljoen jaar nodig had om zich op deze manier te vormen. Na verloop van tijd koelt het oppervlak van een planeet af en dan ontstaat de eerste vaste stenen korst. Op aarde vormen de warmte die vrijkwam bij de botsingen en de warmte van het radioactief verval van elementen samen een continue warmtemotor die de mantel van de planeet in beweging houdt. Enkele honderden kilometers onder onze voeten is het taaie gesteente in de mantel nog altijd aan het bewegen. Op sommige plekken kan het gesteente door deze warmte smelten waardoor het als vloeibaar gesteente tijdens vulkaanuitbarstingen over het oppervlak kan uitstromen. Ook op onze buurplaneten Venus en Mars zien we dat talrijke vulkanen het oppervlak sieren, waaruit blijkt dat het binnenste van deze planeten zich aanvankelijk op een vergelijkbare manier ontwikkelde.

In tegenstelling tot de andere rotsachtige planeten oogt het oppervlak van de planeet Mercurius aanzienlijk anders. Asgrauw en met een landschap dat bezaait is met inslagkraters lijkt deze planeet op een andere manier ontwikkeld te zijn dan onze directe buurplaneten. Een grote botsing met een andere protoplaneet was funest voor de ontwikkeling van de zon-aanbiddende planeet. Tijdens een schampschot werd vermoedelijk een grote hoeveelheid van het gesteente van Mercurius de ruimte in geschoten. Hierdoor bleef er een planeetbolletje achter waarvan de opbouw aanzienlijk anders is dan van de andere rotsplaneten. Snijd je Mercurius doormidden, dan zie je dat de metalen kern 85% van de totale doorsnede uitmaakt. Dat is veel in vergelijking met de aarde waar de metalen kern 55% van de totale doorsnede is. Door toedoen van de catastrofale botsing heeft Mercurius in ver-

houding tot de aarde een grote metalen kern met daaromheen een flinterdunne stenen schil. Net als op aarde zitten er in dat gesteente ook radioactieve elementen die dankzij hun verval zorgen voor warmte. Doordat Mercurius een aanzienlijk deel van dat gesteente verloor, raakte de planeet ook de radioactieve bestanddelen kwijt die de planeet binnenin van warmte konden voorzien. De warmtebalans veranderde hierdoor zó sterk dat de planeet in rap tempo begon af te koelen. Zelfs de zinderende hitte van de zon was onvoldoende om de planeet nog warm te houden. Terwijl de warmte uit de planeet wegsijpelde, begon ook de grote metalen kern langzaam af te koelen. Het effect van die afkoeling wist een Nederlander in de achttiende eeuw met een prachtig experiment te illustreren, zonder dat hij het zelf destijds wist.

Vraag iemand om de naam van een beroemde Nederlandse wetenschapper, en de kans is groot dat men Christiaan Huygens noemt. Weinig mensen zullen de naam Willem 's Gravesande laten vallen. Toch is deze wetenschapper van groot belang geweest in de Nederlandse wetenschap, al is het alleen maar om het effect van een afkoelende Mercurius in dit boek te illustreren. Tijdens een van zijn buitenlandreizen leerde 's Gravesande de Britse wetenschapper Isaac Newton kennen. Het werk van de grondlegger van de moderne natuurkunde over bewegingen werd een belangrijke drijfveer in 's Gravesandes eigen werk toen hij terug was in Nederland. Na zijn inauguratie als hoogleraar in 1717 aan de Universiteit van Leiden ontwikkelde hij een serie experimenten die hielp het werk van Newton te bevestigen en, belangrijker nog, het uit te dragen naar een breder publiek. Het was de beste promotie voor Newtons werk, waardoor de theorieën van de Britse wetenschapper voet aan de grond kregen op het Europese continent. 's Gravesande was de eerste wetenschapper die demonstratie-experimenten gebruikte om wetenschappelijke fenomenen aan een groot publiek uit te leggen. Hij is vergelijkbaar met de hedendaagse docent in de natuurkundeles op de middelbare school. Als

wetenschapper is 's Gravesande nooit doorgebroken met een bijzondere bijdrage aan de wetenschap, maar dankzij zijn experimenten was hij in zijn tijd een van de beroemdste wetenschappers op het Europese vasteland.

Het meest memorabele experiment van 's Gravesande draagt ook vandaag de dag nog zijn naam. De *bol van 's Gravesande* is een klassiek experiment waarmee het uitzetten en krimpen van metalen wordt geïllustreerd. Het experiment verscheen in de editie van 's Gravesandes boek *Physices elementa mathematica* in 1742. Hij liet door zijn instrumentenmaker een ronde metalen bol en een metalen ring maken die op kamertemperatuur perfect pasten. Al hangend aan een handvat of ketting kon hij de bol vervolgens verwarmen in heet water of in de vlam van een spiritusbrander. De magie in dit experiment vindt vooral plaats op het minuscule niveau van de atomen.

Alle atomen en moleculen trillen van nature. Wanneer je de bol van 's Gravesande opwarmt, zorg je ervoor dat door de hogere temperatuur de moleculen harder trillen waardoor ze meer bewegingsruimte nodig hebben. Voor ijzer vertaalt die grotere bewegingsruimte per centimeter zich naar een uitzetting van een duizendste van een millimeter voor elke graad opwarming. 's Gravesande liet in zijn virtuoze colleges zien dat de metalen bol door de opwarming een fractie van een millimeter groter werd en daardoor niet meer door de koudere ring paste. Hij koos bewust voor de vorm van een bol zodat hij kon laten zien dat de uitzetting in alle richtingen plaatsvond en dat de bol echt op geen enkele andere manier door de ring te passen was. Na het afkoelen in een bak water had de bol vervolgens weer zijn oorspronkelijke afmetingen aangenomen, waardoor hij weer moeiteloos door de ring paste. Het effect van warmte op het uitzetten van metalen voorwerpen is een fenomeen dat op tal van plekken in ons dagelijks leven terugkomt.

Een krap half jaar later loop ik op een zaterdagochtend weer over de Hortusbrug bij de Amsterdamse Hortus. De kier tussen

de brugdelen is nu beduidend groter en ik hoef mijn schuifmaat niet eens te gebruiken om te zien dat de brug in het koude herfstweer korter is dan in de zomerhitte zes maanden eerder. In Amsterdam zijn er naast de Hortusbrug zeker tien andere bruggen die met regelmaat in de zomerperiode gekoeld moeten worden. Bij temperaturen boven de 25 graden trekt de stad Amsterdam een speciaal hitteplan uit de kast om de beweegbare bruggen over hoofdvaarroutes te koelen in een poging ze in werking te houden. Voor de commerciële scheepvaart die de hoofdstedelijke wateren aandoet, is dat in de zomer een godszegen. 's Gravesande liet al in de achttiende eeuw zien dat het uitzetten van metaal een heel normaal en natuurlijk fenomeen is. Waterkoeling blijft daarom ook de komende jaren nog nodig, zeker omdat de zomers warmer worden en hittegolven langer kunnen duren. Tot in de jaren negentig rukte de Amsterdamse brandweer nog uit om verkoeling te bieden, maar inmiddels hebben speciale koeldiensten en vaste koelopstellingen die taak overgenomen. En met succes, zelfs tijdens de records brekende hittegolf in de zomer van 2015 konden de Amsterdamse bruggen een deel van de tijd gewoon in bedrijf worden gehouden.

De langzame afkoeling van de metalen kern in de planeet Mercurius had hetzelfde effect als het afkoelen van de bol in het experiment van 's Gravesande en de waterkoeling op de bruggen in Amsterdam. De metalen kern van de planeet kromp. De omvang van de kernkrimp werd in de jaren zeventig met behulp van een ruimtesonde voor het eerst ontdekt. Vanaf 1974 vloog de Amerikaanse Mariner 10-satelliet enkele malen langs Mercurius. Tijdens de drie scheervluchten van Mariner 10 slaagden onderzoekers erin om bijna de helft van het oppervlak in kaart te brengen. Onderzoekers besteedden daarbij speciaal aandacht aan het reliëf van het landschap, zoals inslagkraters en bergketens, omdat dit hen iets kon vertellen over de ontwikkeling van de planeet.

Net als op Mercurius was het ontstaan van dit reliëf op aarde een onderwerp van een verhitte wetenschappelijke discussie. In