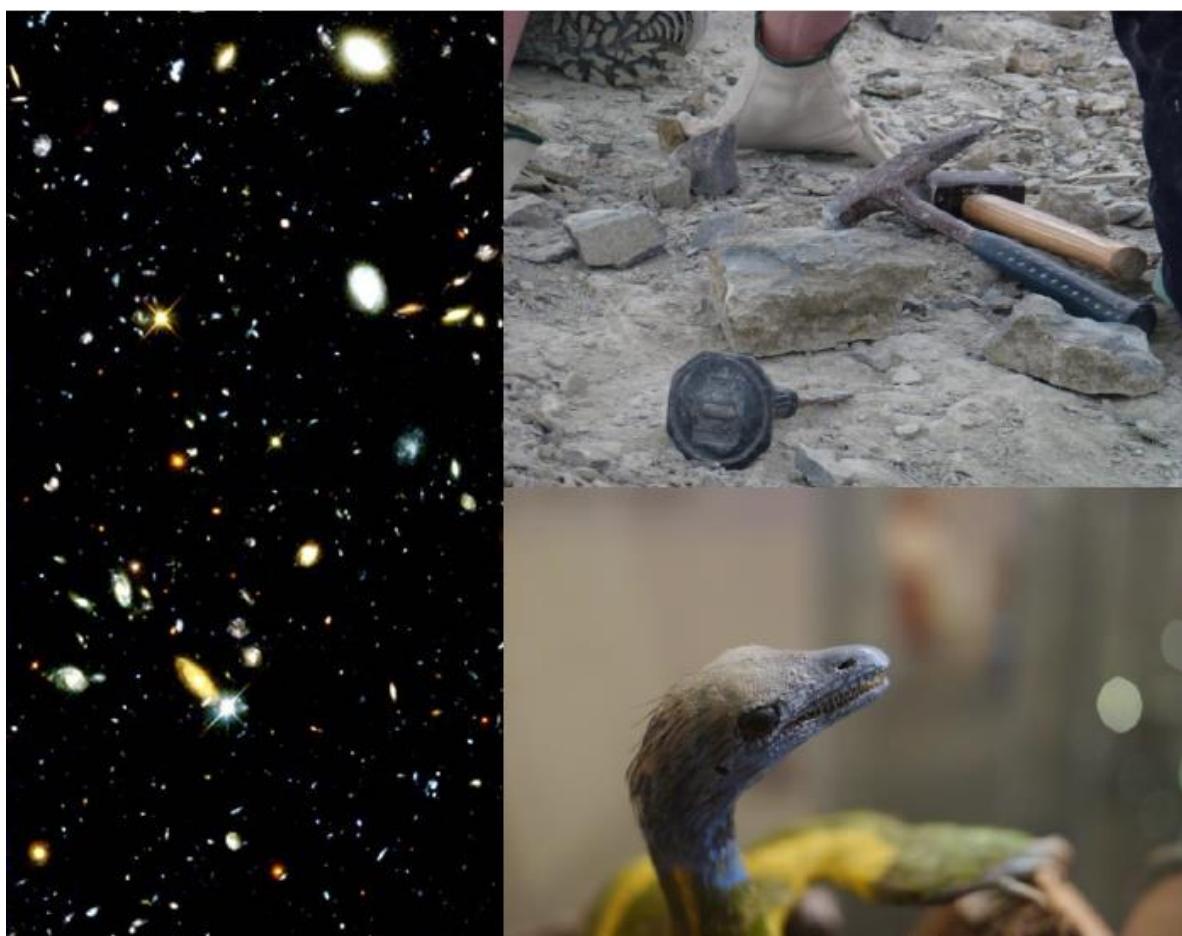


Onderzoek naar Oorsprong

Over de werkwijze van de natuurwetenschappen



NLT module voor VWO
in opdracht van GRIP- G4

Versie 1.0, mei 2014



Introductie.....	3
Deel 1: Bij Geologie	7
1. DE ONDERGROND VAN NEDERLAND.....	8
2. GESTEENTEN ONDERZOEKEN	13
3. TIJDSBEPALINGEN IN DE GEOLOGIE	17
4. VERKLARINGEN: ONTSTAAN VAN AARDLAGEN	23
Deel 2: Paleontologie	30
5. FOSSIELEN.....	30
Deel 3: Bij evolutiebiologie.....	35
6. DNA.....	36
7. EVOLUTIETHEORIE.....	38
8. BIOINFORMATICA.....	43
9. DE FYLOGENETISCHE BOOM VAN WALVISSEN.....	48
Deel 4: Bij de astronomen	63
10. AFSTANDEN METEN IN HET HEELAL.....	64
11. DE OERKNAL	71
Deel 5: Filosoferen over wetenschap	85
12. WAT IS WETENSCHAP?.....	85
Eindopdrachten	100

Verantwoording

De geschiedenis van de kosmos en het leven op aarde is één van de meest ingewikkelde vraagstukken die de mensheid te ontrafelen heeft. In religieuze bronnen en overleveringen zijn veel verhalen over oorsprong te vinden. De Bijbel begint met de oorsprong (Genesis) van hemel en aarde en al wat leeft. Het werk van de scheppende God staat daar centraal. Op veel andere plaatsen in de Bijbel wordt ook het scheppingswerk en zijn almacht over de kosmos benadrukt. Daaruit komt naar voren dat God de schepper is en de mens de kroon op de schepping vormt. In de loop der eeuwen wordt steeds meer de natuurwetenschap ingezet om antwoord te vinden op de vragen rond ontstaan en geschiedenis van de werkelijkheid.

Vanuit de grondhouding van een geschapen werkelijkheid, is in de zeventiende eeuw de moderne natuurwetenschap opgekomen. Er is een betrouwbare God die schepper is, buiten de natuur staat en haar aan wetten heeft onderworpen. Maar wel op zo'n manier dat de mens die wetmatigheden kan ontdekken en gebruiken.

Deze grondhouding is in de laatste twee eeuwen door velen vervangen door de opvatting dat verklaringen over de natuur en haar oorsprong ontleend moeten worden aan de waargenomen wetmatigheden. Geen verklaringen waarin invloeden van een godheid een rol spelen, omdat die Godheid niet aanwijsbaar of bewijsbaar is. Een naturalistische grondhouding.

Controverse

In het onderzoek naar oorsprong komt de controverse in deze grondhoudingen op alle manieren tot uiting. Aan de ene kant in de manier waarop levensbeschouwing een rol speelt (of zou mogen spelen) binnen de wetenschap. Aan de andere kant waar de grens ligt van wat nog bij het wetenschappelijke terrein behoort. Een botsing van religieuze opvatting, maar ook een botsing van wetenschappelijke benadering. Geloof tegenover geloof, en wetenschap tegenover wetenschap.

Toch wordt de tegenstelling vaak gepresenteerd als scheppingsgeloof tegenover (seculiere) wetenschap. Dit leidt tot de opvatting dat de wetenschap in staat is om te bewijzen dat de inhoud van geloof incorrect zou zijn.

Deze module gaat over natuurwetenschap, niet over geloof. De grondhouding is dat de natuur is voortgebracht door het werk van God de schepper. Met de methode van de natuurwetenschap kijken we naar de manier waarop onderzoek naar oorsprong gedaan wordt. Welke conclusies worden daar aan verbonden? Tot waar kan het terrein wetenschappelijk verkend worden en gaan conclusies over in wereldbeschouwing? Kan de mens met hulp van wetenschap geldige uitspraken doen over een tijd waar waarnemingen van zijn of te doen zijn? En aan de andere kant: wat gebeurt er als de bijbel bron voor wetenschappelijke uitspraken wordt?

Dit vraagstuk is voor ieder die de Bijbelse openbaring recht wil doen, en tegelijk de wetenschap serieus neemt, een lastig terrein. Vooral omdat vanuit de wetenschap claims naar voren komen die geloven in God de schepper moeilijk maken. Het is om die reden belangrijk om zicht te hebben op de werkwijze en de begrensdheid van de wetenschap om deze van geloof en wereldbeschouwing te kunnen onderscheiden.

Een module over de werkwijze van de natuurwetenschap

Onderzoek naar Oorsprong is gemaakt voor het vak Natuur Leven en Technologie met als doel om de werkwijze van de natuurwetenschap te belichten binnen de context van de vraagstukken over het ontstaan van kosmos en leven. De zoektocht begint als Tom met zijn oom Tom in de buurt van Winterswijk een fossiel vinden. Ze gaan bij de universiteit langs om te achterhalen wat ze hebben gevonden. De wetenschappelijke methode wordt gebruikt om antwoord te geven op de vraag naar de ouderdom van een fossiel dat aangetroffen wordt in de kalksteengroeve in Winterswijk. Via de dateringsmethoden, aardlagen en continentverschuiving komen ze bij de reconstructie van fossielen en het gebruik evolutionaire stambomen. Ouderdomsbepaling en verwantschapsanalyse blijkt voor een belangrijk deel het domein van de evolutiebiologie, die zich bedient van (voor iedereen toegankelijke) databases met informatie over DNA. De vraag naar de ouderdom van de stoffen waaruit het leven is opgebouwd brengt hen bij de sterrenkundigen, die bezig zijn met kosmologie en de theorie van het uitdijende heelal. De zoektocht mondigt uit in een gedeelte waarin oom Tom, de filosoof, een boekje open doet over het stellen van vragen en de werkwijze en begrenzing van natuurwetenschap.

Bij ieder onderwerp zijn thema's te vinden waardoor leerlingen zich kunnen verdiepen in de verschillende modellen die gemaakt zijn om aardlagen, fossielen of elementen te kunnen verklaren. Soms zijn modellen gemaakt vanuit tegenovergestelde wereldbeschouwingen. De analyse hiervan is bedoeld om inzichtelijk te maken waar de grens van de natuurwetenschap bereikt is en levensbeschouwing een rol gaat spelen. De module is in opdracht van GRIP -G4 ontwikkeld voor gebruik in de leerjaren 5 en 6 van het vwo bij het vak NLT. Delen ervan kunnen ook gebruikt worden bij aardrijkskunde, biologie, natuurkunde, ANW of filosofie.

De auteurs wensen iedereen plezierig en nuttig gebruik van dit lesmateriaal.

De module is ontwikkeld door

Ir. J.A. van Loon (GSR Rotterdam)

Drs. H. Schilthuis (Guido de Brès Amersfoort)

Dr. J.J. Wietsma (Greijdanus Zwolle), eindredactie

In opdracht van Gereformeerd Identiteitsplatform GRIP -G4, waar ook de auteursrechten liggen.

Drs. H. van Leeuwen

© GRIP-G4, 2014

www.grip-g4.nl

Introductie

Op reis met Tom en Tom

'Ma, waar is m'n zwarte T-shirt?'

Buiten adem rent Tom de trap af. Het is de eerste dag van de herfstvakantie. Vandaag vertrekken ze. De rugzak op z'n slaapkamer zit al aardig vol. Alleen nog wat T-shirts erin en Tom is klaar voor het avontuur. Hij is zestien, zit in VWO 5 en gaat deze week backpacken in de Achterhoek met z'n oom Tom, de jongste broer van z'n vader. Ze schelen maar 14 jaar en hebben samen al heel wat beleefd. Lange schaatstochten in de winter en de Strandzesdaagse in de zomer. Op verjaardagen zitten ze vaak met elkaar te redeneren. Spottend worden ze in de familie wel eens 'TomTom' genoemd.

Oom Tom werkt aan de universiteit. Hij doet daar iets vaags met filosofie. Wat precies is Tom nog niet helemaal duidelijk. Het is hem wel duidelijk, dat z'n oom genoeg vakantie heeft om leuke dingen te doen. Nu gaan ze er met de rugzak op uit, slapen op een boerencamping of zo maar in de natuur. Elke dag minstens 40 km lopen en maar kijken waar je uitkomt. Tom heeft er onwijs veel zin in. 'Beloof je te sms-en? Wij gaan ook op vakantie, en we willen graag weten hoe het met je gaat'. 'Ja, mam, dat zal ik doen.'

sms van TOM op maandag 17 oktober

Met de trein naar Zutphen. Vanaf 12 uur 25 km gelopen. Mooie omgeving. Veel boerderijen, houtwanden en stukjes bos. Gezellig gekletst met Tom. Staan nu in Lochem op boerencamping. Nog 3 andere tenten op camping. Gaan straks Chinees halen. Groetjes, Tom.

sms van Tom op dinsdag 18 oktober

Hoi ma, hoest daar? Vandaag vroeg opgestaan. 7 uur. Ontbijt met croissants en lekkere verse broodjes. Half negen weg. Beetje gedwaald. Mooi weer, 22 graden en volop zon. 40 km gelopen naar Winterswijk. Liepen langs een diepe zandafgraving vlak voor de camping. Mooie SVR-camping. 's Avonds bij WC gestruikeld over een flinke steen. Enkel doet onwijs veel pijn. Groetjes, Tom.

Tom strompelt met hulp van Oom Tom naar de eigenaar om te vertellen wat hem is overkomen. De boer belooft Tom naar de dokter te brengen, maar wil graag weten hoe het ongeluk gebeurd is. Ze gaan samen terug naar het WC gebouwtje. Tom wijst de steen aan. De boer pakt hem op. 'Wat voor steen is dat, dat die hier ligt?' vraagt Tom. 'Ach, die is bij de aanleg van de camping bij het egaliseren boven gekomen. Ik vond het wel een bijzondere steen. Dat is nu 13 jaar geleden.'

Tom: 'Dus die steen is 13 jaar oud?' 'Zou je kunnen zeggen,' zegt de boer.
'Mag ik eens kijken? Hé, grappig, daar lijkt wel een schelpafdruck in te zitten. Ziet er leuk uit.
Mag ik de steen mee hebben als trofee?'
'Mij best, dan is het hier ook weer veilig. Kom ik breng je nu naar de dokter.'

sms van Tom op woensdag 19 oktober

Wordt niks. Bij dokter geweest. Enkel zwaar gekneusd. Moet met krukken lopen. Ga naar huis. Bel nog wel. Groetjes, Tom

Woensdag, in de trein naar huis

Tom haalt de steen maar eens te voorschijn uit z'n rugzak. Ze bekijken hem van alle kanten. De boer beweert dat hij 13 jaar geleden uit de grond is gekomen. 'Maar hoe oud zou die steen echt zijn? En die schelp is toch een fossiel?' vraagt Tom. Nadenkend kijkt oom Tom z'n neef aan.



Figuur 1: De steen van Tom

'Hé Tom, ik heb een idee. Onze voettocht is nu toch in het water gevallen en we hebben allebei de rest van de week vrij. Je ouders zijn er niet. Zullen we bij een paar collega's van mij langs gaan op de universiteit? Die hebben er echt verstand van.'

'Maar hoe moet het dan met die voet van me?'

'Je kan in ieder geval op krukken vooruit. En je ziet meteen iets van de universiteit. Kun je vast nadenken over een studierichting na je examen.'

'Is dat niet erg saai? Krijgen we college of zo?'

'Nee, joh, we kunnen mee kijken in de keuken. Dan zie je echt hoe wetenschap werkt.'

'En waar beginnen we dan?'

'Ik denk, dat we het beste eerst naar geologie kunnen gaan. Ik zal kijken of we morgenochtend daar terecht kunnen.'

'OK dan maar, met mijn pootje kan ik toch weinig anders beginnen'.

sms van Tom op woensdagmiddag 19 oktober

Weer thuis. Gaan met steen langs afd uni. Meteen studie-info voor later

Deel 1: Bij Geologie

Opzet van dit deel

Vanuit de vondsten in de kalkgroeve in Winterswijk proberen we zicht te krijgen op de technieken die de geologie en paleontologie gebruiken om de (ontwikkeling van) de aarde en het leven te bestuderen. Over welke middelen beschikt de geologie om de ouderdom van gesteenten en fossielen te bepalen? Dit deel van de module gaat eerst over feitelijke beschrijving van aardlagen, met als resultaat de *geologische kolom*. De geoloog wil vervolgens verklaren op welke manier en hoe lang geleden de aardlagen gevormd zijn. Deze *historische geologie* doet sporenonderzoek, interpreteert feiten en stelt hypothesen over de manier waarop de vorming van aardlagen in het (verre) verleden heeft plaatsgevonden. Hierbij spelen vooronderstellingen en theorieën een belangrijke rol en is plaats voor discussie over modellen.

Leerdoelen:

Je kunt uitleggen wat de geologische kolom is en hoe die tot stand gekomen is.

Je kunt voorbeelden geven van de drie hoofdtypen gesteente: afzetting, vulkanisch en metamorf en hoe deze tot stand zijn gekomen.

Je kunt uitleggen hoe ouderdomsbepaling van gesteenten in zijn werk gaat met *superpositie, radiometrie en fossielen*.

Je kunt gebruikmakend van het begrip halfwaardetijd en aanwezige elementen uitleggen welke methode geschikt is als de geschatte ouderdom gegeven is.

Je kunt uitleggen welke betekenis de theorie van de platentektoniek heeft bij het verklaren van de aanwezigheid van sedimenten.

Je kunt de begrippen feit, interpretatie, theorie, model en extrapolatie gebruiken in de context van een discussie over de geologische geschiedenis.

Je kunt het onderscheid aangeven tussen actualisme, uniformitarisme en catastrofisme en met argumenten aangeven hoe opvattingen van geologen met elkaar botsen.

Donderdag 20 oktober

Tom en Tom bezoeken de vakgroep geologie van de universiteit waar oom Tom werkt. Daar worden ze ontvangen door professor dr. Freek Ossiel.

Hij bekijkt de steen nauwkeurig en vraagt: 'Waar heb je die vandaan?'

Tom antwoordt: 'We hebben die steen gevonden op een camping in Winterswijk. Ik struikelde erover en kneusde m'n enkel. Door die rotsteen loop ik nu met krukken!'

'In Winterswijk is inderdaad een steengroeve, waar je vrij gemakkelijk fossielen kan vinden. Ik ben er heel vaak met mijn studenten geweest om veldwerk te doen. Dit is kalksteen, met fossiele schelpdieren. Die kalksteen is gevormd doordat zeer fijne slibdeeltjes op de bodem van de toenmalige zee neerdealden. Gestaag ging dit proces miljoenen jaren door. In de loop van de tijd bouwden zich zo tientallen meters dikke kalksteenlagen op. Door bewegingen in de ondergrond is de kalksteen aan de oppervlakte komen te liggen. En nu kunnen we er in graven en heel veel fossielen vinden'.

'Was er vroeger een zee in Winterswijk?'

'Jazeker, en jouw fossiel is de afdruk van een schelpdier dat ooit in die zee leefde. Zo zie je maar, wat een fossiel beestje ver na zijn dood nog kan aanrichten. Het is kalksteen en de fossiele tweekleppige heet *Myophoria vulgaris*. Je fossiel komt uit het Trias. Het is 240 miljoen jaar oud. *Myophoria* wordt gebruikt als een gidsfossiel voor het Trias. Dit helpt ons om te bepalen welke aardlaag we te pakken hebben, omdat zo'n fossiel vrijwel alléén in die laag te vinden is'.

'En hoe weet u dit allemaal zo zeker?'

'Ja Tom, dat is een heel verhaal, ga er maar eens rustig voor zitten en geef je been rust'.

'Hé Tom, je stelde net een filosofische vraag!', merkt oom Tom op, 'Bij filosofie zijn we telkens bezig met onderscheiden van uitgangspunten, feiten en interpretaties en de manier waarop een wetenschappelijke theorie tot stand komt'.

'Jawel', zegt professor Ossiel, 'Er zijn ook in de geologie behoorlijke discussies over onze modellen. Die komen we ook nog wel tegen. We starten bij Winterswijk'.

1 DE ONDERGROND VAN NEDERLAND

Nederland is een land met zachte bodem en veel water. Tenminste, aan de oppervlakte. De diepere ondergrond blijkt op een diepte vanaf enkele tot honderden meters uit gesteente te bestaan. Er zijn een paar plaatsen in ons land waar die harde ondergrond aan de oppervlakte komt, zoals bij Winterswijk in de Achterhoek. Toen daar in 1932 onder een weiland kalksteen werd gevonden ging men die winnen en sinds die tijd is deze steengroeve in gebruik. De brokkelige kalksteen (zie kader) wordt gebruikt in asfalt bij de wegenbouw en als kunstmest. De *Muschelkalk*, zoals het gesteente genoemd wordt, bevat veel fossielen. Je kunt ze zelf gaan zoeken als de groeve (op zaterdagen van april tot november) opengesteld is voor publiek.

Kalksteen (CaCO_3) is een carbonaat, waarin ook dolomiet ($(\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) gevormd kan worden. De dichtheid hiervan is kleiner, waardoor het gesteente gaat scheuren en er verwering optreedt. Ook Krijtsteen (mergel) is CaCO_3 , maar bestaat uit de skeletjes van algen (Coccolieten).

De *Muschelkalk* van Winterswijk en de fossielen die daar in zitten vormen puzzelstukjes voor respectievelijk geologen en paleontologen. Fossielen (versteende resten of afdrukken van organismen) vormen het materiaal waarmee de paleontoloog de geschiedenis van het leven in kaart brengt.

Vraag 1: Het Trias

Trias betekent letterlijk: bestaat uit drie.
(a) Welke drie lagen zijn dat? (b) Hoe oud dateert men het Trias? (c) Welk deel van het Trias is in de groeve van Winterswijk te zien?

Vraag 2: Fossielen

(a) Wat zijn fossielen? (b) Wat is er bekend over de omstandigheden waaronder fossielen kunnen ontstaan?



Figuur 2; De groeve in Winterswijk

Het werk van de geoloog

De geologie gebruikt verschillende methoden om de bouw van de aardkorst en de ligging van de verschillende aardlagen in kaart te brengen. Opmeten en intekenen van een gebied op een kaart is het *karteren*, de eerste stap om te kunnen beschrijven welke grondsoort of gesteente aan de oppervlakte aanwezig is. Om lagen dieper in de bodem te zien ben je afhankelijk van afgravingen of steengrooves, om daarvan een *profielanalyse* te doen.

Mijnbouw en de zoektocht naar aardgas en -olie zorgden voor machines om diepe *boringen* te doen. De holle boren nemen gesteenten (boorkernen) mee omhoog, waardoor het mogelijk is om een bodemprofiel te maken tot kilometers diepte. Ook in Nederland zijn veel boringen gedaan. Het gesteente uit de boorkernen wordt bewaard door TNO, in het Kernhuis in Zeist. Deze organisatie beheert ook de bijbehorende boorgegevens in de DINO database. Je kunt deze gegevens via internet raadplegen, bijvoorbeeld via www.geologievannederland.nl. Veel boringen leverden geen bruikbare dingen op. Op een aantal plaatsen werd aardolie of -gas gevonden, zoals onder Schoonebeek en Slochteren. Andere plaatsen leverden steenkool (Limburg, de Achterhoek) of zout (Boekelo, Harlingen) op. Deze zoektocht heeft ertoe geleid dat de ondergrond van Nederland tot een diepte van 4 tot 5 kilometer vanaf de oppervlakte nauwkeurig in kaart is gebracht. In *opdracht 3* ga je hiermee aan het werk.

Met geluidsgolven en trillingen is het mogelijk om tot tientallen meters diepte de opbouw van de ondergrond en de soorten gesteente driedimensionaal in beeld te brengen. Deze techniek wordt *seismiek* genoemd.

Figuur 3: Geologische technieken

Oppervlakte:	Kartering van een geologische formatie (voorbeeld: Harz) Profielanalyse (voorbeeld: profiel van een ontsluiting in Zuid Limburg of de Grand Canyon in de VS)
In de diepte:	Boringen: kolommen tot 5 km diepte Seismiek: grote oppervlakken, enkele m tot km diepte.

In 1977 deed de Nederlandse Aardolie Maatschappij vlak bij Winterswijk één van de diepste boringen tot een diepte van 5009,5 meter. Men vond er geen olie of gas, maar wel steenkool (in het Carboon) en steenzout. Bij die boring werd voor het eerst gesteente uit het Devoon bereikt.



Figuur 4: Boorkernen (links zandsteen met olie, rechts steenzout). Foto van www.museon.nl.

Carboon en *Devoon* zijn namen van enkele van de aardlagen uit de *geologische kolom*, een wetenschappelijk model dat de volgorde en kenmerken van aardlagen beschrijft en een naam geeft. Er wordt *verondersteld* dat elke gesteenteformatie in een bepaalde tijdsperiode is afgezet, wat de *geologische tijdschaal* wordt genoemd. Op de site www.stratigraphy.org is de officiële geologische kolom met bijbehorende -tijdschaal te vinden. Zie ook figuur 5 of in BINAS.

In de volgende opdrachten kijken we welke geologische lagen er in de ondergrond van Nederland te vinden zijn.

Opdracht 3: Boorprofielen [Computer met internet; ongeveer 30 minuten]

Bezoek de website: www.geologievannederland.nl. Kies in het menu voor *ondergrond* en dan *boorprofiel*. Je krijgt een venster met de kaart van Nederland te zien in *Google maps*.

Begin met een *boorprofiel* van de bodem op de plaats waar jij je nu bevindt (als je tenminste in Nederland bent). Klik met de muisaanwijzer op de gewenste plaats op de kaart. Grote plaatsen zie je zonder inzoomen, voor andere kun je de +/- tekens op de kaart gebruiken. Klik met de muispijl en zet daarmee de speld op de gewenste plaats en kies onder de kaart voor de knop *Boorprofiel* tonen. In het vak onder de kaart komt nu een profiel in kleur met de diepte en naam van de aardlaag.

Opslaan van de afbeelding: Ga met de muisaanwijzer op de afbeelding staan en kies via de rechtermuisknop voor Kopie afbeelding / Copy image. Open het bestand *Opdracht boorprofielen* in de map *opdrachten* en plak het plaatje in de linker kolom in de tabel. Doe dit voor de plaatsen Amsterdam, Utrecht, Slochteren, Zwolle, Winterswijk, Enschede, Geleen, de plaats van je school en je eigen woonplaats.

Alternatief zonder opslaan: noteer of, en op welke diepte, ieder van de lagen Cambrium, Ordoviciun, Siluur, Devoon, Carboon, Perm, Trias, Jura, Krijt, Tertiair, Quaternair, in het boorprofiel aanwezig is. Doe dit voor de plaatsen Amsterdam, Utrecht, Schoonebeek, Slochteren, Harlingen, Zwolle, Winterswijk, Enschede, Geleen, Middelburg, de plaats van je school en je eigen woonplaats.

Als je de tabel helemaal gevuld hebt beantwoord je de volgende vragen.

- Bij welke plaats ligt het *Carboon* relatief dicht aan de oppervlakte? Wat werd er op die plaats met de Carboonlaag gedaan?
- Hoe diep ligt Carboon onder de oppervlakte op de verschillende plaatsen die je bekijken hebt? Wat is je conclusie?
- Wat is de diepte tot waar gegevens bekend zijn op de plaatsen die je bekijken hebt? Noteer dit getal onderaan de lijst. [Om dit zichtbaar te maken in de opgeslagen profielen, sla je het bestand op. Daarna bewerk je de boorprofielen uit de afbeelding zo, dat de onderzijde op de juiste diepte weergegeven wordt. Dit kun je doen door de afbeeldingen te verkleinen, zodat de schaal dezelfde is. Als je de getallen niet meer kunt lezen raadpleeg je de opgeslagen versie.]
- Zijn er lagen die in sommige van de afbeeldingen ontbreken? Probeer hiervoor een verklaring te noteren.

Geologische tijdschaal				
Eon	Era	Periode	Tijdvak	Datum (miljoen jaar geleden)
Fanerozoïcum	Cenozoïcum	Quaternair	Holoceen	0,01
			Pleistoceen	1,8
			Plioceen	5,3
			Mioceen	23
		Tertiair	Oligoceen	34
			Eoceen	56
			Paleoceen	65
			Krijt	145
	Mesozoïcum	Jura		199
		Trias		251
Precambrium	Paleozoïcum	Perm		299
		Carboon		359
		Devoon		416
		Siluur		443
		Ordovicium		488
		Cambrium		542
		Proterozoïcum		2500
	Archeaan			4600

Figuur 5: Geologische kolom en -tijdschaal

Opdracht 4: Boorprofielen [Computer met internet, ongeveer 30 minuten]

Bezoek de website: www.geologievannederland.nl. Kies in het menu voor **ondergrond** en dan **boorprofiel**. Je krijgt een kaart van Nederland te zien. Zie opdracht 1 voor aanwijzingen.

In de omgeving van Winterswijk zijn de boorprofielen zeer wisselend van samenstelling. Aan de hand van de boorprofielen kun je nagaan welke geologische laag aan de oppervlakte ligt.

De steengroeve van Winterswijk ligt aan de Steengroeveweg in Ratum en bestaat uit Muschelkalk. Zoek deze locatie in de buurt van Winterswijk, en maak enkele digitale profielen. Kun je met de gegevens uit deze profielen vaststellen of het juist is dat de Muschelkalk een onderdeel is van het Trias. Tot welke diepte is het Trias in Nederland te vinden (zie de gegevens van opdracht 3)?

- Van welke geologische lagen kun je in de buurt van Winterswijk de afzettingen nog meer aan de oppervlakte aantreffen?

Het is ook mogelijk om een dwarsdoorsnede te laten berekenen. Je schakelt bij de tab ondergrond naar dwarsdoorsnede. Probeer dit eens uit door twee spelden op de kaart te prikken, en het profiel zichtbaar te maken. Je kunt op deze manier het verloop van de lagen volgen.

Bij de speurtocht naar aardolie of -gas zal men zoeken naar plaatsen waar die zich vanuit de moedergesteenten in het Carboon kunnen ophopen. Het poreuze gesteente waar gas in voorkomt (Rotliegendet) bevindt zich onder een gasdichte laag (vaak steenzout), en hoopt zich op in een naar boven gebolde plooï. NAM en Shell zijn Nederlandse bedrijven die aan olie- en gaswinning doen en daarbij intensief gebruik maken van geologische kennis om de juiste boorplaats en -diepte te vinden.

Maak in de buurt van Slochteren een profiel (tussen de plaatsen Nieuw Scheemda en Groningen) en probeer vast te stellen in welke gesteentelaag het aardgas zich ophoert. Doe hetzelfde bij de vindplaats van olie in Schoonebeek (teken een lijn van Coevorden over Schoonebeek naar de grens met Duitsland).

b. Kun je aanwijzen in welke laag de aardolie zou kunnen zitten?

Probeer of je bij Enschede (horizontale lijn Gronau - Enschede) een zoutlaag kunt ontdekken.

c. Welke geologische laag moet je daar voor hebben en hoe diep zit die?

Opdracht 5: Seismiek

Seismisch onderzoek wordt veel gebruikt in de aardwetenschappen. Zoek hier informatie over en geef een korte uitleg over de werking van seismiek.

Leg uit wat de rol is van de voortplantingssnelheid in de bodem en hoe daar conclusies uit getrokken worden. Hoe maak je onderscheid in de verschillende lagen?

[Bronnen: bijvoorbeeld Wikipedia, zoek op termen als seismiek, bodem, Nederland].



Figuur 6: Elke hamertik kan weer een verrassing opleveren....

* Opdracht 6: Verzakkingen

Gaswinning, mijnbouw of erosie kunnen verzakking van de bodem tot gevolg hebben. Zoek een of meer voorbeelden van recente bodemverzakkingen en ga na waardoor die ontstaan en hoe ernstig de gevolgen zijn.

2 GESTEENTEN ONDERZOEKEN

2.1 Soorten gesteente

De geoloog begint zijn werk in het veld bij een plaats waar het gesteente aan de oppervlakte komt. De beschrijving van alle facetten van een gesteentelaag op een vindplaats wordt *facies* genoemd, onderscheiden in de *lithofacies* (het gesteente zelf) en *biofacies* (fossielen en andere sporen van organismen).

Bij de beschrijving van een gesteente is de samenstelling (aard van de mineralen), vorm, structuur, grootte van korrels en gelaagdheid van belang.

De vele soorten gesteenten worden, op basis van hun ontstaan, ingedeeld in drie hoofdtypen:

- 1 *vulkanisch gesteente* (graniet, basalt)
- 2 *afzettingsgesteenten* (sedimenten) en
- 3 *vervormd (metamorf) gesteente*.

Door verschuivingen van platen in de aardkorst, vulkanisme, verwering, regen, waterstroming en wind is er een constante omzetting van gesteenten, ook wel de gesteentecyclus genoemd.

Vraag 7: Gesteentecyclus

Maak een eenvoudige tekening van de gesteentecyclus, waarin de drie categorieën (vulkanisch, afzettingsgesteente en metamorf gesteente) met elkaar in verband gebracht worden. Welke processen laten de gesteenten in een andere vorm over gaan?

Opdracht 8: Gesteenten

Vraag of zoek enkele stukken gesteente en zoek hiervan de naam op en ook bij welke hoofdgroep (vulkanisch, afzetting, metamorf) het gesteente thuishoort. Met zoutzuur is na te gaan of het gesteente kalk bevat (bruisen). Alternatief: zoek op internet van elke hoofdgroep enkele voorbeelden die in Nederland kunnen worden gevonden.

2.2 Sedimenten

Voor het achterhalen van de historie van de aarde zijn sedimenten (afzettingen, al dan niet in versteende vorm) een rijke bron van informatie, mede omdat hierin de meerderheid van de fossielen te vinden is. De herkomst van het gesteentemateriaal (moedergesteente), dikte, volgorde, positie, aanwezige soorten fossielen, vervorming en dergelijke geven allemaal aanwijzingen. In sedimentair gesteente is te herleiden op welke manier het gevormd is.

Een *clastisch* gesteente is gevormd uit fragmenten van moedergesteenten die door verwering en andere afbraakprocessen vergaan zijn. Het materiaal is door rivieren,

gletsjers, zwaartekracht, zeestromingen en wind in allerlei combinaties naar de vindplaats getransporteerd.

Elke manier van transport laat zijn eigen sporen na. Zo neemt een *gletsjer* alle gesteente dat op zijn weg komt mee, en als het achterblijft na het smelten van het ijs is een mengsel van allerlei formaten, hoekigheid en gelaagdheid te vinden. Op de schuifvlak van het ijs worden enorme stenen juist gladgeschuurde.

Waterstroming laat brokken steen door ketsen en rollen steeds ronder worden, totdat er keien ontstaan. Hoe kleiner een steen is, hoe makkelijker die meegevoerd wordt met het water. Als de stroomsnelheid afneemt zullen steeds kleinere deeltjes uit het water bezinken. Hierdoor is de korrelgrootte in een sediment (ook) een maat voor de stroomsnelheid die het water ter plaatse gehad heeft tijdens de afzetting.

Vraag 9: Rivierafzettingen

Op welke manier kun je de stroomsnelheid van een rivier aflezen aan de afzetting van materiaal in de rivierbedding als je van bron tot monding gaat?

Wanneer wind het sediment gevormd heeft is dat terug te zien in de ronde en gladde vorm van de korrels. Dergelijke aanwijzingen zijn nodig om het ontstaan van een gesteente te kunnen verklaren. Om de oorsprong te kunnen achterhalen zijn aannames nodig over de manier waarop de vormende krachten werken en welke sporen zij achterlaten. Als dit zorgvuldig gebeurt is zeer veel informatie uit een gesteente af te leiden.

Vraag 10: Windafzettingen

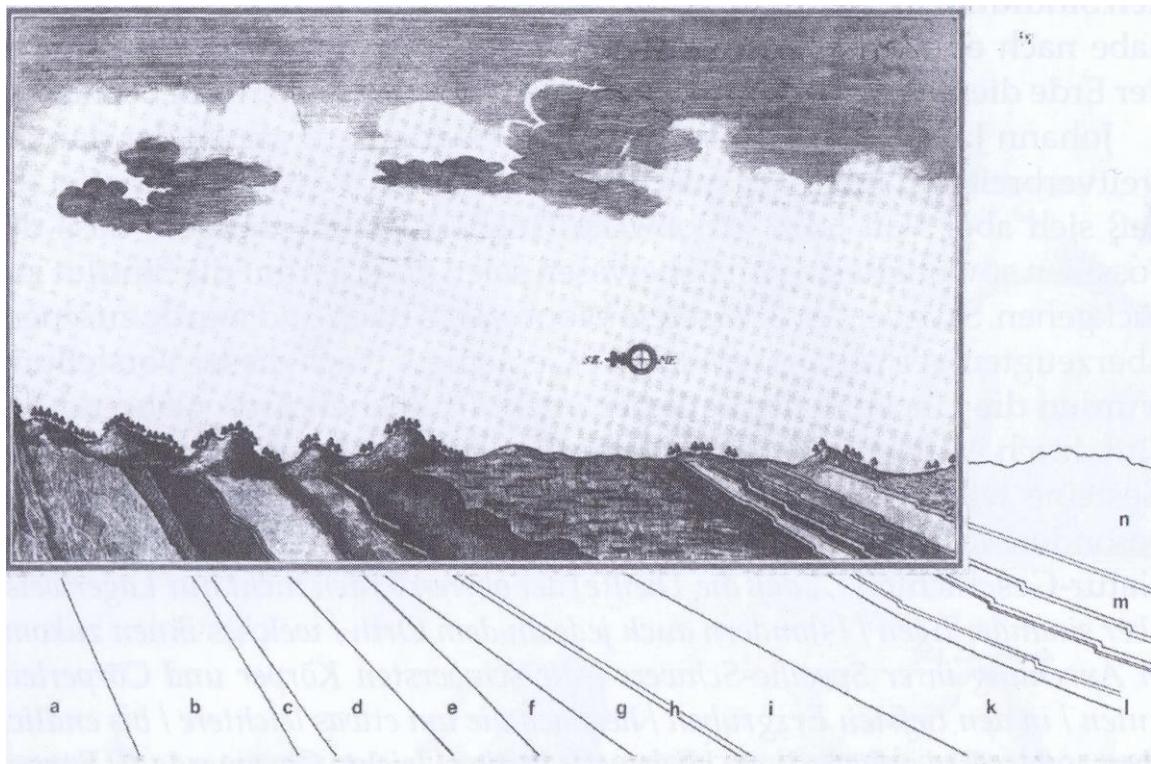
Waar kun je in Nederland windafzettingen vinden, hoe heten ze en wanneer zijn ze ontstaan?

Lang niet alles is met het blote oog waarneembaar. Een geoloog zal van veel gesteenten een monster meenemen en daarvan slijpplaatjes maken die onder de microscoop worden bekeken. Verder wordt met chemische bepalingen vastgesteld uit welke mineralen het gesteente is opgebouwd. Dit is allemaal nodig om het gesteente te kunnen determineren.

2.3 Ordening: de geologische kolom

Aan het eind van de 18^e eeuw hebben onderzoekers, vooral afkomstig uit West Europa, een begin gemaakt met de systematische beschrijving van de gesteenten in de aardkorst. Allerlei kenmerken als hardheid, mineralensamenstelling, aanwezige fossielen en structuur werden gebruikt voor deze beschrijving, waarvoor telkens een typelocatie werd gebruikt op de plaats waar de gesteenten *dagzomen* (aan de oppervlakte zichtbaar worden). Ook werd duidelijk dat de gesteenten in een vaste volgorde in de aardkorst voorkomen, de zogenaamde *geologische kolom*. De lagen kregen namen als *Devoon* (naar het graafschap Devon in Engeland), *Jura* (naar de gelijknamige streek van de Frans-Zwitserse alpen), *Cambrium* (de Latijnse naam voor Wales), *Siluur* en *Ordovicium* van Keltische stammen. De bovenste laag van het *Krijt* heet *Maastrichtiën*, omdat de typelocatie bij Maastricht aan het oppervlak gevonden wordt.

Zie hiervoor de geologische kaart van Europa, waar getekend is welke aardlaag op welke plek aan de oppervlakte komt (figuur 9).



Figuur 7: Tekening van een deel van de Hartz, door Lehmann (ca 1775), een

In het Hartzgebergte in midden-Duitsland liggen lagen van de geologische kolom op bepaalde plaatsen niet óp maar naast elkaar (figuur 7). Een profieltekening geeft aan hoe de sortering is, maar geeft geen antwoord op de vraag hoe de aardlagen ontstaan zijn, en welke ouderdom ze hebben. Hiervoor is veel interpretatie nodig. In tegenstelling tot wat vaak gedacht wordt was het merendeel van de onderzoekers in de 18^e eeuw niet van mening dat alle aardlagen door de bijbelse Zondvloed ontstaan zijn. Velen beperkten het *diluvium* - zondvloed - tot één roodbruine laag, het *Rotliegendes* in het Perm, omdat dit fossiele kiezelbeton veel restanten van andere gesteenten bevat. Bij Winterswijk is deze laag in het grensgebied met Duitsland aan de oppervlakte te vinden als rode leem.

De *feitelijke beschrijving* van de geologische kolom is rond 1800 wel zo ongeveer gereed. Het achterhalen van de ontstaansgeschiedenis vereist *interpretatie* van de waargenomen kenmerken en het combineren van gegevens uit veel verschillende bronnen.



Figuur 8: Conglomeraat (fossiel kiezelbeton), Perm, *Rotliegendes* uit Malmedy, Ardennen

De geologische kolom is in lagen verdeeld met allerlei onderscheidende kenmerken, als mineralensamenstelling, aanwezige fossielen, positie en structuur. In de volgende opdracht verzamel je groepsgewijs meer informatie over de kenmerken van die verschillende lagen.

Opdracht 11: Kenmerken van de lagen in de geologische kolom [groepje]

Kies per groepje één van de volgende geologische lagen: Cambrium, Perm, Siluur, Devoon, Carboon, Trias, Jura, Krijt, Pleistoceen. Ga op onderzoek uit, en probeer antwoord te vinden op de volgende vragen:

- a. Welke kenmerkende fossielen kunnen in deze geologische laag worden aangetroffen? (Vraag aan je docent of er fossielen van de betreffende periode beschikbaar zijn om te bekijken. Gebruik hierbij het practicumvoorschrift Fossielen).
- b. Zijn in de lagen sporen te vinden van de omstandigheden waarin deze laag en de fossielen gevormd zijn (bijvoorbeeld bijeengeveegd, rampen, geleidelijke sedimentatie). Waar leidt men dat uit af?
- c. Komt de betreffende laag in Nederland voor? Welke klimatologische omstandigheden denkt men dat er heersten in de periode dat de laag gevormd is? Op welke ouderdom wordt deze geologische laag geschat, en hoe wordt deze ouderdom gemeten?
- d. Men heeft van iedere laag (periode) een reconstructie gemaakt hoe de aarde er toen uitzag. Zoek enkele afbeeldingen van die reconstructies op, en probeer na te gaan op welke gegevens deze gebaseerd zijn. Er zijn behoorlijk scherpe begrenzingen tussen de geologische lagen. Waar komt dat door?
- e. Waar kun je deze laag aantreffen, en hoe kom je er bij? Is de laag economisch interessant? Waardoor is dat zo?

Gebruik bronnen uit: de map *achtergrondmateriaal voor leerlingen* (weblinks); Wikipedia, www.geologievannederland.nl en biologieboeken.

Maak in overleg met je docent 2 A4 met een korte beschrijving met illustraties van je bevindingen, of geef een presentatie van 5-10 minuten (met 3 dia's).



Figuur 9: Geologische kaart van Europa met oppervlaktelagen (Bron: www.fossiel.net)

3 TIJDSBEPALINGEN IN DE GEOLOGIE

3.1 Hoe oud is de aarde?

Na het beschrijven van de aardlagen, de geologische kolom, in de periode tussen 1750 tot 1850 was er nog geen antwoord op de vraag hoe oud de aarde en deze afzettingen zijn. Ook nu wordt aan deze puzzel nog steeds gewerkt. Men probeerde op allerlei manieren te achterhalen hoe oud de aarde kon zijn. Beroemd zijn de berekeningen van de Ierse bisschop James Ussher (1650), die uit de geslachtsregisters in de bijbel berekende dat de

aarde op 23 oktober 4004 voor Christus geschapen moest zijn. Natuurwetenschappers probeerden de ouderdom vast te stellen met meetbare verschijnselen. Bijvoorbeeld door het zoutgehalte van de oceaan te gebruiken (zouten worden met rivierwater mee gespoeld). Anderen berekenden de afkoeling van de aarde zoals James lord Kelvin die in 1897 op basis van zijn berekeningen een ouderdom van 24 miljoen jaar vaststelde. Hij kon niet weten dat de kernreacties in de aarde warmte produceren, waardoor de ouderdom minder hoog leek. Zijn berekening werd in die tijd tegengesproken door Ernest Rutherford. Hij deed metingen aan radioactief verval in gesteenten, in het bijzonder *zirkoonkristallen* die door vulkanisme aan het oppervlak gekomen zijn, en kwam met een leeftijd van de aarde van zo'n 4,5 miljard jaar. Deze waarde is door later onderzoek nauwelijks meer gewijzigd. Over deze zoektocht kun je meer lezen in Bill Bryson, *Een kleine geschiedenis van bijna alles*, hoofdstuk 5.

Tom vraagt: 'Ik ben wel nieuwsgierig om te weten hoe oud deze steen nu is. Hoe kom je daar achter?'

3.2 Hoe dateer je een gesteente?

Opdracht 12: Tijd in de geologie

In de achtergrondinformatie is het artikel *Tijd in de geologie* (door Reinoud Veenhof), uit Radix (2004) te vinden. Daarin wordt een overzicht gegeven van de verschillende dateringstechnieken en interpretaties binnen de geologie. Als je dit artikel doornemt krijg je een mooi overzicht van de verschillende mogelijkheden en randvoorwaarden van dateringsmethoden, plus de interpretaties die vervolgens in de geologie nog nodig zijn. Bij meerdere opdrachten in het vervolg van dit hoofdstuk kun je gegevens uit het artikel gebruiken.

Interpretatie speelt een zeer belangrijke rol in de geologie. De auteur geeft aan dat 90% van de uitspraken in de geologie interpretaties zijn. Welke argumenten heeft hij voor deze bewering?

3.2.1 Dateren met fossielen

De geoloog beschrijft voor de ouderdomsbepaling van een gesteente de vindplaats, kenmerken van de mineralen en aanwezige fossielen. Een *relatieve datering* vertelt alleen of lagen ouder of jonger zijn dan andere. Daarbij geldt het principe van de *superpositie*: de jongste laag ligt bovenop. Lagen kunnen over elkaar heen geschoven of geplooid zijn, of zelfs omgekeerd. Als het gesteente fossielen bevat kunnen die helpen om vondsten van verschillende locaties te koppelen. Bepaalde fossiele organismen kunnen dienen als *gidsfossiel*, omdat ze wereldwijd in één



Figuur 10: Gidsfossiel voor Trias (Muschelkalk) in Museum Frerik, Winterswijk.

bepaalde geologische laag voorkomen, zoals *Myophoria vulgaris* voor het Trias. Begeleidende fossielen kunnen informatie geven over het *milieu* waarin de fossielen gevormd zijn. Een *absolute* datering geeft de ouderdom van een gesteente in jaren.

Opdracht 13: Gidsfossielen

- Zoek naast het Trias van nog drie geologische perioden op welke fossielen als gidsfossiel te gebruiken zijn.
- Welke aannames en eigenschappen bepalen of een fossiel geschikt is als gidsfossiel?

Vraag 14: Aannames

Het bepalen hoe lang processen nodig hebben, bijvoorbeeld afzetting of erosie, vereist dat er iets bekend is over de snelheid waarmee dat proces plaatsheeft. Er is méér nodig dan alleen te kijken naar het eindresultaat. Daarbij zijn aannames en vooronderstellingen nodig, die van invloed zijn op de berekening. Een voorbeeld: als je thuis de keuken binnenstapt en je onder de druppende kraan een halfvolle emmer aantreft zou je kunnen berekenen hoe lang die emmer daar staat. Tenminste: als je de juiste gegevens hebt.

Ga na welke aannames er in deze situatie gelden om een juiste uitspraak hierover te kunnen doen.

Opdracht 15. Verschillende dateringsmethoden

Methode	Hoe werkt het en op welk materiaal?	Tijdschaal (nu - jaren geleden)	Hoe betrouwbaar / nauwkeurig	Absolute / relatieve datering
Paleomagnetisme				
Dendrochronologie				
Radioactief verval				
Gidsfossielen				
Superpositie				
Stratigrafie				
Pollenanalyse				

Neem de tabel over en vul hem in. Zoek bij iedere methode de gegevens die in de tabel gevraagd worden. Welke methode is het meest geschikt voor zeer oude afzettingen? Bij welke methoden wordt gewerkt met organisch materiaal?

3.2.2 Radiometrische datering

Nauwkeurige ouderdomsbepalingen van de werkelijke leeftijd (de *absolute* datering) is mogelijk door radioactief verval te meten, zoals van ^{40}K naar Ar en ^{238}U / ^{235}U naar Pb en ^{14}C naar ^{14}N . Als in een gesteente of ander materiaal radioactief materiaal aanwezig is, en de hoeveelheid daarvan uitsluitend verandert door radioactief verval gedurende de tijd, dan is dit in principe geschikt om de verlopen tijd te registreren.

Vraag 16: Halfwaardetijd

Neem onderstaande tabel over en noteer de halfwaardetijd van het betreffende element (zie Binas, tabel 25). Noteer ook wat er bekend moet zijn om radioactief verval te gebruiken voor het meten van tijdsduur.

Element	Halfwaardetijd	Wat moet er bekend zijn om tijdbepaling te doen?
^{40}K		
$^{238}\text{U}/^{235}\text{U}$		
^{14}C		

Welke onzekerheden zijn er bij dateringsmethodes?

We kijken naar de Koolstof-14 (^{14}C) methode, die gebruikt wordt voor de datering van materialen van organische oorsprong tot enkele tienduizenden jaren ouderdom.

Radioactief koolstof ontstaat in de atmosfeer, onder invloed van kosmische straling. Een deel van de koolstof in het gas CO_2 (ongeveer 0,03% van de lucht) wordt van de stabiele ^{12}C naar de instabiele (radioactieve) ^{14}C isotoop omgezet. Het ^{14}C vervalt naar ^{14}N en zendt daarbij een elektron (bètadeeltje) uit. Dit verval wordt beschreven met de halfwaardetijd, dat is de tijdsduur die nodig is om de helft van de aanwezige atomen te laten vervallen.

Dus de radioactieve straling vermindert iedere halfwaardetijd met 50%. Ook twee andere C isotopen (^{10}C en ^{11}C) zijn instabiel, maar zijn nauwelijks interessant voor datering omdat de halfwaardetijd zo kort is (maximaal 20 minuten).

Het radioactieve isotoop wordt met de CO_2 opgenomen door planten en vastgelegd in glucose, en andere koolstofverbindingen. Via deze verbindingen komt het terecht in de voedselketen en zit uiteindelijk in alle levende wezens. Als de koolstofverbindingen intact blijven kan de hoeveelheid ^{14}C alleen maar afnemen, omdat het niet aangevuld wordt met nieuwe ^{14}C uit de atmosfeer.

**Vraag 17: Koolstofdatering

a. Noteer de vervalreactie van ^{14}C , en bereken na hoeveel jaar er nog 1% van de oorspronkelijke ^{14}C over is.

Een stukje hout bevat koolstof, waarvan 1 ppt (part per trillion = $1 / 10^{12} = 10^{-12}$ %) bestaat uit ^{14}C . Bereken hoeveel elektronen er door radioactief verval uit dit stukje hout vrij zullen komen gedurende 24 uur, wanneer bekend is dat er 2,0 gram zuivere koolstof in het houtmonster aanwezig is.

Over 10.000 jaar wordt de meting herhaald. Hoeveel elektronen zullen er naar verwachting dan uit dat houtblokje vrij komen in 24 uur?

Door de relatief korte halfwaardetijd van radioactief koolstof, en het geringe gehalte aan het begin, zal een object na 50.000 jaar nog maar een uiterst kleine hoeveelheid ^{14}C bevatten, mits er geen uitwisseling van koolstof met de atmosfeer is.

Vraag 18: Waarneming en interpretatie

Welke elementen van radiometrische datering met de Koolstof-14 methode zijn waarneming en welke interpretatie?

Voor een nauwkeurige bepaling van de ouderdom is het noodzakelijk dat een aantal dingen bekend zijn.

- Hoe groot is de hoeveelheid ^{14}C die in de atmosfeer aanwezig is?
- Hoe groot is de hoeveelheid / het percentage ^{14}C dat is vastgelegd in organisch materiaal?
- Is alle ^{14}C die in het materiaal zit ook meetbaar?
- Is de radioactieve vervalsgesnelheid nauwkeurig bekend?
- Is de nauwkeurigheid van de meting voldoende, ofwel: wordt alle verval geregistreerd?

Eén ding is intussen wel duidelijk geworden: de aanmaak van ^{14}C in de atmosfeer onder invloed van kosmische straling is niet constant. De fluctuatie blijkt samen te vallen met de activiteit van de zon (periodieke zonnevlekken) waardoor de hoeveelheid kosmische straling, en dus de productie van ^{14}C , wisselt. Een meting moet daarom gecorrigeerd worden voor dergelijke verschillen. Dat is *kalibratie*. Zie voor meer uitleg hierover: <http://nl.wikipedia.org/wiki/C14-datering>.

Koolstofdatering: werkwijze

Uit het te dateren materiaal wordt een kleine hoeveelheid afgewogen. Afhankelijk van de meettechniek wordt het materiaal goed schoon gemaakt en opgelost (in een organisch oplosmiddel) of verkoold.

De *vloeistof scintillatie* methode werkt met een oplosmiddel waarin lichtflitsjes ontstaan als er een betadeeltje doorheen schiet. Dit deeltje komt vrij als een ^{14}C atoom vervalt tot ^{14}N . Als in een bepaalde tijd het aantal flitsjes geteld wordt is bekend hoeveel koolstof vervallen is. Als bekend is hoeveel koolstof in het oplosmiddel aanwezig is én het aantal vervallen ^{14}C deeltjes kan de verhouding $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ berekend worden.

Met massaspectrometrie wordt verkoold materiaal (puur C) onder hoge druk omgezet in grafiet (kristallijn C). Men plaatst dit in de spectrometer. Met enorme snelheden worden Cesium-ionen op het preparaat geschoten. De vrijkomende C vormt negatieve ionen, die versneld worden in een buis met 25 MV spanning. De ionen worden afgebogen in een magneetveld, en treffen vervolgens een detector. De afbuiging is afhankelijk van de *massa* van het ion. Dus ^{12}C wordt iets verder afgebogen dan ^{14}C . Door precies de inslagplek op te zoeken kan het aantal ^{14}C atomen geteld worden in verhouding tot de ^{12}C en ^{13}C deeltjes. Uitgebreide informatie op wikipedia (pagina over ^{14}C datering) en <http://c14.arch.ox.ac.uk>.

Als je er meer over wilt lezen: Zie het boek Kleine encyclopedie van het leven in het pleistoceen (artikel over de ^{14}C methode) en kijk in de weblinks (in achtergrondinformatie voor leerlingen), waartussen ook veel kritische geluiden te vinden zijn.

Vraag 19: Nauwkeurig meten?

Ga voor ieder van de uitgangspunten bij de ^{14}C methode na welke invloed ze hebben op de nauwkeurigheid en betrouwbaarheid van de methode.

Er zijn onderzoekers die proberen de betrouwbaarheid van de ^{14}C methode te controleren, en zij komen met verrassende resultaten. Uit de gegevens die hiervoor besproken zijn is duidelijk dat er in gesteente van meer dan 1 miljoen jaar oud geen meetbare hoeveelheid ^{14}C te verwachten is. Toch blijkt dit nog wel meetbaar te zijn. Hoe zou dat te verklaren zijn?

3.2.3 Datering van gesteenten met hoge ouderdom

Bij de K-Ar methode gaat men er van uit dat ten tijde van de vorming van een gesteente er een bepaalde hoeveelheid radioactief ^{40}K aanwezig is, afkomstig uit de aardmantel. Als het gesteente stolt (na een vulkanische uitbarsting) kan de Ar die vrijkomt bij het verval van K niet meer ontsnappen. Daardoor wordt de concentratie Ar steeds groter. Hoe ouder het gesteente, hoe meer Ar gevormd is (en zich ophoert). Hierbij moet je *aannemen* dat de hoeveelheid K alleen maar verandert door radioactief verval. Ar mag in het begin niet aanwezig zijn, en ook niet ontsnappen. Bovendien ga je er van uit dat het radioactieve verval ook constant is.

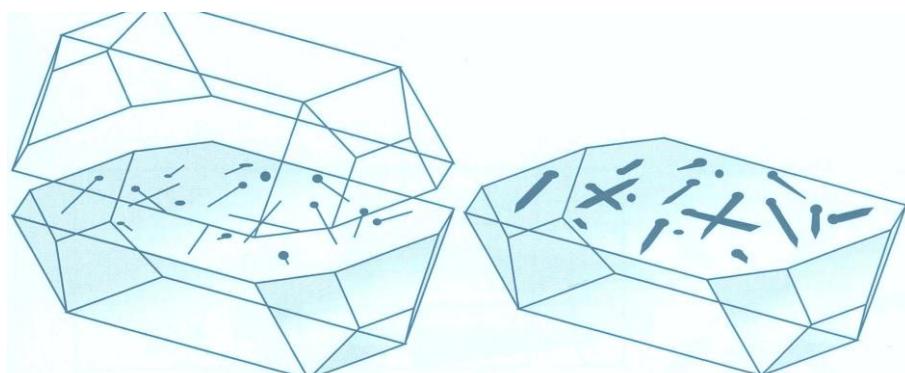
Na de ontdekking van de radioactiviteit heeft Ernest Rutherford begin 20^e eeuw een methode ontwikkeld om het verval van Uranium te meten in Zirkoniumkristallen. Deze kristallen bevatten een relatief hoge concentratie Uranium. Alle isotopen van Uranium zijn radioactief. ^{238}U en ^{235}U vervallen tot ^{206}Pb en ^{207}Pb . Lood heeft één isotoop, ^{204}Pb dat *niet* uit radioactief verval ontstaat. De andere isotopen van Lood ontstaan door verval van ^{238}U en ^{235}U en $^{232}\text{Thorium}$. Met een massaspectrometer (de SHRIMP) is het in Canberra (Australië) gelukt om de exacte concentraties van deze elementen én de isotopen daarvan in kristallen Zirkonium te meten.

Met ^{204}Pb als referentie is precies bekend hoeveel Pb er oorspronkelijk ingezet heeft. Daardoor is precies vast te stellen hoeveel Pb er ontstaan is door verval. Daaruit is de ouderdom te berekenen.

Aangenomen dat er geen verstoringen geweest zijn in de loop van de tijd.

Rechtstreekse meting van radioactief verval is verre van nauwkeurig als het gaat om materiaal met een hoge ouderdom. Weinig radioactief materiaal én een zeer lage vervalsnelheid maakt dat de straling lang niet altijd meetbaar is boven de ruis van de achtergrondstraling.

Een iets afwijkende methode wordt gebruikt om de leeftijd vast te stellen van kristallen *apatiet*, dat veel voorkomt in vulkanisch gesteente. Zoek op internet maar eens naar de ingewikkelde samenstelling ervan. Bij de kristallisatie van apatiet, tijdens het afkoelen van vulkanisch magma, is ook een beetje radioactief Uranium opgesloten. Wanneer het



Figuur 11: Sporen in Apatietkristallen, gevormd door verval van Uranium. Rechts de sporen na etsen in zuur. [bewerkt naar: Hoe werkt de Aarde?, De Meijer, p 158]

Uranium vervalt schieten de stralingsdeeltjes met zo'n energie weg dat ze sporen vormen in het kristal. Als je het kristal openzaagt en in zuur etst kunnen de sporen met de microscoop geteld worden. Wanneer ook de concentratie ^{204}Pb via massaspectrometrie te meten is, lukt het om de leeftijd van het kristal te berekenen. Deze methode werkt ook als de radioactiviteit zo laag is dat die niet boven de achtergrondstraling uit komt.

Vraag 20: Radioactieve datering

- a. Wat gebeurt er met de berekende leeftijd van een gesteente als radioactieve K wegspoelt? En wat wanneer Ar ontsnapt?
- b. Beredeneer hoe bruikbaar de K-Ar methode voor een afzettingsgesteente / sediment is.
- c. Welke van de radiometrische dateringsmethoden U-Pb, K-Ar en ^{14}C zijn geschikt voor afzettingsgesteenten in Nederland? Waardoor is dat zo?
- d. Waardoor ontstaat achtergrondstraling bij radioactieve bepalingen?

Vraag 21: Weet je het zeker?

- a. Wat moet je allemaal weten om een laag in de Muschelkalk van Winterswijk precies (absoluut) te dateren?
- b. Is het mogelijk om gebruik te maken van radiometrische datering?
- c. Welke methoden zijn er nog meer bruikbaar voor dit type gesteente?

Tom: 'De ouderdom van mijn steen is blijkbaar moeilijk precies vast te stellen. Kunt u uitleggen hoe u dan toch zo precies kunt vertellen dat de steen 240 miljoen jaar oud is?' 'Voor deze uitspraak is meer nodig dan een enkele ouderdomsbepaling', geeft Prof. Ossiel toe, 'daarvoor is veel interpretatie van de gegevens in aardlagen nodig. Daar wil ik jullie nu over gaan vertellen.'

4 VERKLARINGEN: ONTSTAAN VAN AARDLAGEN

4.1 Verklaringen

Geologen die de gesteenten van Winterswijk bestuderen zoeken naar een verklaring hoe dit gesteente gevormd is. Is het snel, of langzaam gevormd? Op land, in water, door wind? Hoe lang geleden? Door te vergelijken met huidige gebieden op aarde lijken de afzettingen het meest op een *marien sediment*, een afzetting op een soort waddenzeebodem.

Sommige lagen lijken op een uitgedroogde kleibodem, vol met scheuren. In andere lagen vind je een golfpatroon of druppels. Overal zijn fossiele restanten van leven te vinden, zoals dat in een ondiepe zee voorkomt. Je vindt er versteende algenmatten (die kleideeltjes vasthouden), schelpdieren, schubben van vissen, soms een schedel of pootafdrukken van reptielen (sauriërs), kreeften en wormen. Allerlei sporen zoals je die nu op de bodem van de Waddenzee nog tegenkomt zijn in het gesteente terug te vinden. In de kalksteen komen ook mineralen als het pyriet (kristallen van FeS, ook wel gekkengoud) of galeniet (PbS) voor. Het gesteente is vrij zacht en vaak met één hamertik te splijten.

Deze kenmerken zijn een aanwijzing, maar geen afdoende bewijs, voor de snelheid, tijd en omstandigheden dat de afzetting van Winterswijk gevormd is. Hiervoor is meer speurwerk nodig.

Geologen moeten voor het vinden van dergelijke antwoorden een groot aantal wetenschapsgebieden gebruiken. Chemie (samenstelling van gesteenten), fysica (krachten in de aardkorst), biologie (ontwikkeling van het leven), meteorologie (erosie, grondwater en klimaat), oceanografie (zeebodem en continentverschuiving), wiskunde, informatica, enzovoorts. Veel geologen hebben werk omdat er geld te verdienen valt aan het vinden van energiebronnen (olie, gas) en mineralen (diamanten).

Tot nu toe zijn we bezig geweest met processen in de korst van de Aarde die we op dit moment kunnen waarnemen. Dit is het terrein van de actuele of *fysische* geologie. Het geven van interpretaties hoe processen in het verleden hebben gewerkt en geleid hebben tot de huidige aardlagen, oceanen, continenten en atmosfeer is het terrein van de *historische* geologie. Het vakgebied heeft veel weg van forensisch onderzoek, die ook gebeurtenissen in het verleden moet reconstrueren op basis van teruggevonden sporen.



Figuur 12: Sedimentlagen in de Muschelkalkgroeve bij Winterswijk

4.2 Geleidelijke of snelle vorming van aardlagen?

In de tweede helft van de achttiende eeuw leefde sterk de theorie van het *catastrofisme*, die beweert dat snelle rampzalige veranderingen zoals vulkanisme of overstromingen, geleid hebben tot het ontstaan van aardlagen, rivierdalens en oceanen. Over de vormende krachten werden verschillende theorieën opgesteld. Eén richting (de Neptunisten, naar Neptunus, de zeegod) verklaarde dat aardlagen ontstaan in water, en bergen moesten dan ook door de zee afgezet zijn. Vulkanen waren volgens hen niet veel meer dan in brand geraakte steenkool.

De grondlegger van de geologie, James Hutton (1726-1797), publiceerde in 1795 *A theory of the Earth with Proofs and Illustrations*. Pas de herschreven versie uit 1802 was begrijpelijk genoeg om de wetenschappelijke wereld te bereiken met zijn geniale inzichten. Hij legt in het boek bewijzen voor geologische processen naast elkaar en beredeneerde dat veel processen *geleidelijk* verlopen. Hij noemde dat *gradualisme*. Hij gebruikte als een van de eersten wat wij nu kennen als de *wetenschappelijke methode*. Uit zijn theorie is het principe van *uniformitarisme* ontwikkeld. Dat stelt dat de processen die



Figuur 13: Een plaat Muschelkalksteen met afdrukken van schelpdieren (detail rechts); de plaat is een paar tellen eerder gespleten met een geologische hamer.

we nu observeren nog net zo werken als ze gedurende de *aardgeschiedenis* hebben gewerkt. Het heden als sleutel tot het verleden. Hierbij zijn geleidelijke afzetting en erosie de vormende krachten, die lange tijd nodig hebben om hun werk te doen. Hutton merkte verder op dat langdurige erosie de aarde uiteindelijk vlak zou maken. Toch zijn er bergen, waarin de afzettingen ontstaan lijken te zijn in zee. Dit verklaarde hij door aan te nemen dat de aardkorst door inwendige krachten geleidelijk omhoog geduwd wordt en bergketens vormt. Deze denkrichting werd het Platonisme genoemd. Deze gedachte is nu terug te vinden in de theorie van *platentektoniek*. Met Hutton was het catastrofisme vervangen door gradualisme.

Beide richtingen baseren zich op waarnemingen en zijn voor een belangrijk deel afhankelijk van interpretaties. De processen zelf zijn nauwelijks direct waar te nemen. De meeste geologische processen verlopen daarvoor (ook op dit moment) te langzaam, waardoor er veel tijd nodig is om een oceaan of gebergte te vormen. Een mens kan daardoor in zijn leven maar een fragment van die totale tijd waarnemen. Daarnaast bestaat de geologie als wetenschap ook nog maar kort, waardoor er maar weinig processen door de mens waargenomen zijn. Spectaculaire vulkaanuitbarstingen of overstromingen laten hun sporen na, maar gebergten zie je niet plotseling ontstaan.

De meeste theorieën over het ontstaan van aardlagen, continenten, gebergten en oceanen zijn gebaseerd op een korte periode van waarnemingen. Daardoor zijn veel aannames nodig om dergelijke theorieën te kunnen maken. Dat terugredeneren wordt *extrapolatie*.

genoemd. Het is daardoor ook niet zo eenvoudig om met *zekerheid* te zeggen hoe oud een gesteente is. Begint de leeftijd te tellen als het gesteente als vulkanisch materiaal gestold is, als het als afzetting gevormd is of wanneer het uitgehard is? Welke omstandigheden heersten er? Hoe lang heeft de vorming geduurd? Is alles geleidelijk verlopen, of kan het ook sneller geweest zijn?

De aandacht voor catastrofes is teruggekeerd toen duidelijk werd dat onbekend grote vulkaanuitbarstingen en inslagen van meteorieten op veel plaatsen in de aardlagen terug te vinden zijn door de bijzondere sporen die ze nalieten. Bekend is het laagje donkere gesteente met een hoog gehalte (3 deeltjes per miljard) aan Iridium dat toegeschreven wordt aan een meteorietinslag aan het eind van het Krijt (Krijt-Tertiar grens), welke verantwoordelijk wordt gehouden voor het uitsterven van de dinosauriërs.

Vraag 22: Catastrofisme

- Noem drie elementen in bovenstaande uitspraak, die op interpretatie van feiten berusten.
- Georges Cuvier* beschreef de aardlagen in het “Bekken van Parijs” (Paris Basin, zie de geologische kaart van Europa). Welke betekenis zag Cuvier voor rampen bij het ontstaan van de geologische lagen? Gebruik hiervoor Wikipedia.

Vraag 23: Geologische theorie

- Welke argumenten gebruikten Neptunisten en Plutonisten voor hun theorie over de vorming van aardlagen?
- Welke rol speelt extrapolatie in het uniformitarisme van Hutton?
- Welke rol spelen catastrofisme en gradualisme in de huidige geologie?

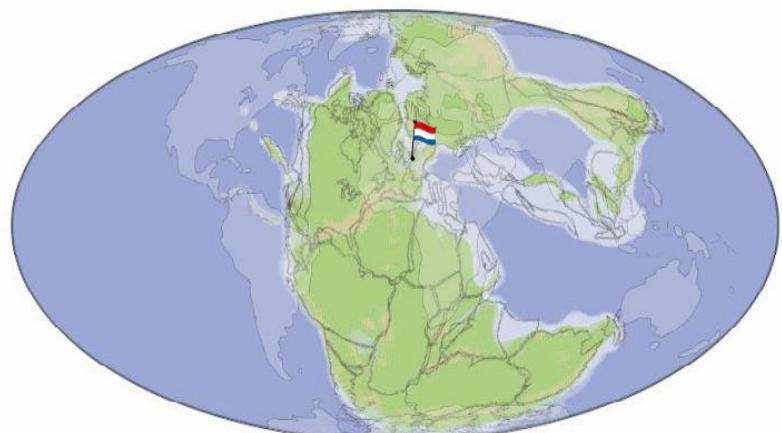
Opdracht 24: De reis van Nederland over de aardbol.

Plattektoniek is de theorie over de verplaatsing van continentale aardkorst over de aardbol. De theorie wordt gebruikt om

klimaatveranderingen in de loop der tijd op het aardoppervlak te verklaren.
a. Noem 4 verschijnselen die de theorie van de platttektoniek ondersteunen.

b. Op welke positie op de aardbol heeft Nederland, volgens de theorie van de platttektoniek, in de loop van de geologische

Figuur 14: Positie van Nederland in het Trias (Bron: www.geologievannederland.nl)



geschiedenis gelegen? Bekijk deze positie in de geologische perioden Cambrium, Devoon, Carboon, Trias, Krijt, Holocene. Bewaar een schermafdruk, zodat je de plaatjes kunt vergelijken. Wat valt je op?

- c. Uit welke gegevens trekt men de conclusie dat een stuk aardkorst op verschillende geografische posities heeft gelegen?
- d. De weergave van de aardkorst in de verschillende geologische perioden is een interpretatie van meerdere gegevens. Probeer op een rijtje te krijgen welke gegevens hiervoor zijn gebruikt.

4.3 Interpretatie en discussie over modellen

Geologie is een wetenschap van interpretaties. De langzame veranderingen en grote schaal van veranderingen maken het lastig om processen te zien gebeuren. Daarom is geologie voor een klein gedeelte het verzamelen van feiten, maar voor het grootste gedeelte interpretatie. Sporenonderzoek met rotsen zou je kunnen zeggen. Dat heeft tot gevolg dat er lang niet altijd eenstemmigheid is over de interpretatie van gegevens. De tijdschaal, de manier waarop een sediment is ontstaan, de samenhang en verplaatsing, alles is afhankelijk van de interpretatie door de geologen.

Donderdagmorgen bij geologie

‘Dus Tom, op deze manieren kunnen we de ouderdom van zo’n fossiel te weten komen. Zo zijn we er achter gekomen, dat deze schelpdieren 240 miljoen jaar geleden hebben geleefd.’

Nadenkend kijkt Tom professor Ossiel aan.

‘Maar hoe zeker bent u hier nu van? En denkt iedereen er hetzelfde over?’

‘Nee, Tom. Er zijn feiten in de geologie. We zien aardlagen en kunnen er foto’s en chemische analyses van maken. Maar daarna volgt de interpretatie. Hoe kunnen we de feiten, die we hebben waargenomen verklaren? Kunnen we misschien een model maken, waar al die geologische feiten in passen?’

Keuzeopdrachten

De volgende vier opdrachten maken het mogelijk om je te verdiepen in de discussies die plaatsvinden over de interpretatie van feitenmateriaal op geologisch terrein. In overleg met je docent voer je één of meer van deze opdrachten uit.

Keuzeopdracht 25: Geologie van Winterswijk

Lees in het document Geologie van Winterswijk (J.E. Hoogerduijn) in de map achtergrondinformatie voor leerlingen meer over deze lagen en hun ontstaan.

Vergelijk deze informatie met wat je kunt vinden op www.geologievannederland.nl. Hoe oud is de Muschelkalk, en onder welke omstandigheden zijn deze afzettingen gevormd, volgens beide bronnen? Hoogerduijn plaatst op het eind van zijn artikel de ontstaansgeschiedenis van de afzettingen bij Winterswijk in breder kader. Geef met argumenten aan hoe tegen deze visie aankijkt.

Keuzeopdracht 26: Het Carboon

Het Carboon is een geologische periode waarvan aangenomen wordt dat er veel (moeras)bossen waren, hoge temperaturen en een hoge concentratie zuurstof in de atmosfeer. Carboonsedimenten zijn de bron van aardolie en steenkool en er zijn afzettingen met talloze plantenfossielen te vinden.

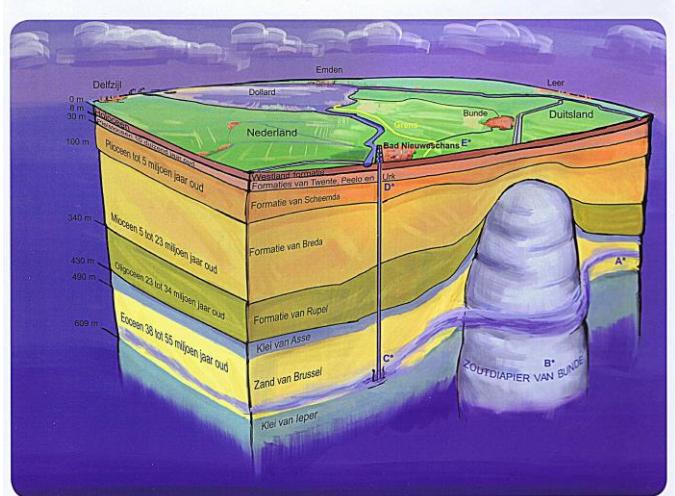
Over de herkomst van de enorm dikke lagen restanten van plantaardig en dierlijk leven is veel gespeculeerd. Zijn de afzettingen ter plaatse gegroeid en geconserveerd? Of zijn restanten vanuit grote gebieden bijeen gespoeld en daarna fossiel geworden?

Werk deze opdracht uit aan de hand van de volgende vragen en aandachtspunten:

- Geef een korte karakteristiek van het Carboon. Maak zonodig gebruik van de informatie uit de eerdere opdracht over fossielen. Beschrijf welke verklaring de gangbare geologie geeft van afzettingen in het Carboon.
- Er zijn alternatieve verklaringen bedacht om de dikke Carboonpakketten te verklaren, terwijl die niet ter plaatse gegroeid zijn. Eén van die verklaringen gaat over drijvende Carboonwouden, zoals beschreven door J. Scheven. Zie de map *achtergrondinformatie voor leerlingen* (*taal: Duits of Engels).
- Maak een vergelijking van beide modellen met de argumenten. Geef daarbij aandacht aan de volgende vragen:
 - Hoe stelt men zich voor hoe de aarde er ten tijde van het Carboon uit zag?
 - Hoe zijn de planten en dieren in de aardlagen bewaard gebleven?
 - Hoe oud wordt Carboon geschat, en hoe wordt die ouderdom vastgesteld?
 - Hoe waarschijnlijk is geleidelijke vorming van de Carboonlagen?

Keuzeopdracht 27: Het ontstaan van steenzout

In Nederland is in de ondergrond op uitgebreide schaal steenzout (haliet) te vinden. Op een aantal plekken is dit zout relatief dicht aan de oppervlakte aanwezig, in zogenoamde zoutpijlers. Deze worden aangeboord en in bepaalde gebieden wordt er zout uit gewonnen. Over de vorming van zoutpijlers zijn verschillende theorieën ontwikkeld. Binnen de standaardtheorie wordt aangehouden dat de zoutafzettingen ontstaan zijn door indampen van (veel) zeewater in een binnenzee. Door herhaald vollopen en indampen van de binnenzee, gedurende een zeer lange tijd, is een dikke laag zout afgezet.



Figuur 15: Zoutpijler in de ondergrond van Duitsland, bij de grens met Groningen

- a. Welke structuur zou een zoutlaag volgens jou moeten hebben, als die is ontstaan door verdamping van zeewater?
- b. Uit welke mineralen bestaat het zout dat uit zeewater is neergeslagen [zie Binas]?
- c. En wat is de samenstelling van steenzout?
- d. Alternatieve verklaringen zijn er ook. Eén verklaring betreft de theorie dat steenzout een vulkanische oorsprong heeft. Lees hierover het artikel van Stef Heerma in de map achtergrondinformatie voor leerlingen.
Vergelijk de verklaring van Heerma met de standaardtheorie (zoals die bijvoorbeeld op www.geologievannederland.nl wordt beschreven. Klik naar: Ondergrond » Afzettingen en delfstoffen » Steenzout).
- e. Hoe oud is in beide modellen het Nederlandse steenzout?
- f. Welke argumenten geeft Heerma voor de vulkanische oorsprong van steenzout?
Hoe beoordeel je zijn argumenten?

Keuzeopdracht 28: Catastrofisme en het ontstaan van de Grand Canyon

Een wereldwijde overstroming, zoals beschreven in de geschiedenis van de zondvloed in de bijbel (Genesis 9), is één van de rampen of catastrofes die als verklaring gebruikt worden voor de aardlagen in de geologische kolom. De aandacht voor catastrofes is in de loop der eeuwen wisselend geweest, mede afhankelijk van de veronderstelde leeftijd van de Aarde. De Franse geoloog Cuvier nam aan dat er een lange reeks van rampen had plaatsgevonden, die de opeenvolgende aardlagen hadden gevormd. De zondvloed was daar één van. Ook nu is onder bijbelgetrouwe onderzoekers nog veel discussie over de betekenis van de zondvloed in het ontstaan van aardlagen. Enkele stromingen gebruiken een wereldwijde zondvloed als verklaring voor het ontstaan van alle geologische afzettingen.

Verschillende bronnen zijn beschikbaar om de rol van catastrofen in de geologie te bestuderen. Een locatie waar de geologische kolom in bijna volle omvang bestudeerd kan worden is de Grand Canyon in Arizona, VS.

riël Roth bespreekt in hoofdstuk 12 van zijn boek Oorsprong de discussies over catastrofen. Hij besteedt veel aandacht aan de interpretaties bij de vorming van de Grand Canyon en wijst ook op ontbrekende perioden in de geologische kolom.

Welke gevolgen heeft een interpretatie op basis van catastrofes voor de benodigde geologische tijd? Denk in je groepje na over de verklaring die het meest recht doet aan de waargenomen verschijnselen. Geef een overzicht van de argumenten en geef aan welke verklaring voor jou het meest overtuigend is.

Deel 2: Paleontologie

Opzet van dit deel

In de afzettingen in de bodem van Nederland zijn interessante fossielen gevonden. Via de beroemde Mosasaurus in mergelgroeven van Limburg komen we bij de *paleontologie*, die onderzoekt hoe het leven er vroeger uit gezien heeft. De groeve van Winterswijk blijkt ook bijzondere overblijfselen van reptielen te bevatten. Deze vondsten helpen om de geschiedenis van het leven op aarde te kunnen beschrijven.

Leerdoelen:

Je kunt beschrijven welke gegevens een paleontoloog gebruikt in zijn werk.

Je kunt de betekenis van de begrippen fossiel, reconstructie, dateringsmethode en geologische kolom uitleggen voor (discussies in) de paleontologie.

5 FOSSIËLEN

5.1 Het verhaal van de fossielen

In de Pietersberg in Maastricht wordt mergel gewonnen, een kalk die veel gebruikt wordt voor de productie van cement. De zachte mergel is al eeuwen gebruikt om blokken uit te zagen die als bouwmateriaal gebruikt werden.

De mergelgroeven zijn interessant door het grote aantal fossielen dat je daar kunt vinden.

In 1770 werd in een gang in de mergelgroeve van de Pietersberg een enorm fossiel ontdekt. De Nederlandse geoloog Hoffmans stelde vast dat het een bijzondere vondst was, en wilde het fossiel voor Nederland behouden. Bij de intocht van de Franse troepen in 1794 werd het fossiel echter in beslag genomen, en naar Parijs gebracht. Daar kwam het in handen van de Franse geoloog Georges Cuvier (1769 - 1832) die het fossiel beschreef en er een reconstructie van maakte. De soort kreeg later de naam *Mosasaurus*, Maashagedis. Cuvier legde de basis voor de paleontologie, de wetenschap die de geschiedenis van het leven op aarde in



Figuur 16: Skelet van *Mosasaurus*, uit de Pietersberg, in het Natuurmuseum Maastricht



Figuur 17: Fossiel van een andere zwemmende sauriër, *Ichthyosaurus*, in Teylers Museum, Haarlem.

kaart brengt en werd wereldberoemd met zijn talloze reconstructies van fossielen. Er zijn daarna nog verschillende andere fossielen van *Mosasauriërs* gevonden die nu o.a. in musea in Maastricht en Haarlem te zien zijn. Kijk voor een overzicht van de musea en de fossielen die ze in huis hebben op www.geologievannederland.nl en in de lijst *musea* in de map achtergrondinformatie voor leerlingen.

Vraag 29: Mosasaurus

In welke geologische laag hoort *Mosasaurus* thuis? Welke leefomgeving hoort bij een dergelijke soort, en hoe zie je dat terug in de andere fossielen die je in mergel aantreft?



Figuur 18: De pootafdruk in de steen van Tom.

De paleontologie heeft sinds de 19^e eeuw een enorme ontwikkeling doorgemaakt. Van duizenden fossielen is uit de kleine of grote brokken, met allerlei onderzoektechnieken uitgepuzzeld hoe het dier of de plant er uit gezien heeft. Ook wordt geprobeerd de ouderdom van de fossielen vast te stellen. Hiervoor wordt gebruik gemaakt van de indeling van de gesteenten in de geologische kolom. Tegelijkertijd worden fossielen gebruikt om een gesteente in de geologische kolom te passen.

Donderdagmorgen bij Geologie

Tom: 'Zou er binnenin mijn steen nog meer te vinden zijn?' Prof. Ossiel knikt. 'We kunnen het proberen, misschien vinden we nog iets interessants'. Hij pakt een kleine beitel en een geologenhamer. 'Wil jij het proberen, Tom?'. Prof. Ossiel wijst op een plek aan de zijkant van de steen. 'Daar de beitel, en een flinke tik geven'. Even later houden ze ieder de helft van de steen vast. Op het breukvlak is van alles te zien, zoals een paar schelpafdrukken die ook aan de buitenkant te zien waren. Na een paar tellen wijst Prof. Ossiel naar een paar kuiljes in zijn helft. In de helft die Tom beet heeft zitten een paar bultjes, die precies in de kuiljes passen. 'Wauw, dit lijkt wel een pootafdruk, Tom. In Winterswijk kom je soms loopsporen tegen van sauriërs, voorlopers van dinosauriërs. We gaan eens op zoek wat het kan zijn.'



Figuur 19: Schedel *Nothosaurus* sp.

5.2 De sauriërs van Winterswijk.

De Muschelkalk is een laag uit het Trias die dieper zit dan het Krijt, en die daardoor ouder moet zijn. In de Muschelkalk die gevormd lijkt in een soort waddenzee heeft men een groot aantal gewervelde diersoorten aangetroffen. Regelmäßig zijn pootafdrukken en sleepsporen van de staart van reptielen gevonden. Sauriërs, die op vier poten liepen en nog het meest lijken op grote hagedissen. *Rhynchosaroides peabodyi* is één van de voorbeelden. Van enkele reptielen zijn skeletdelen teruggevonden, waarvan de resten van

Nothosaurus marchicus nergens anders ter wereld zijn aangetroffen. Men heeft een reconstructie gemaakt van dit zwemmende, twee meter lange dier.

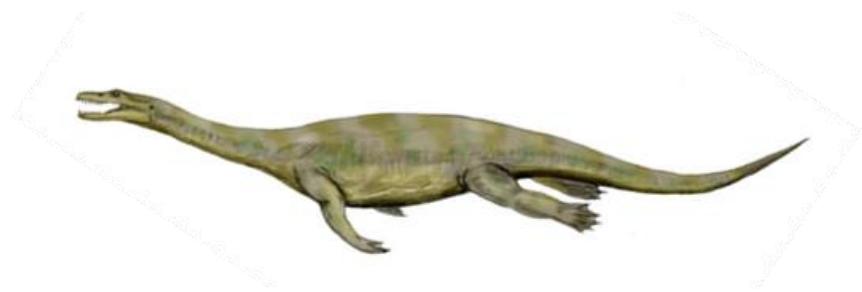
Opdracht 30: Reconstructies

Hieronder wordt een lijstje namen gegeven van fossielen. Zoek nu van deze fossielen op wat voor type organisme dit geweest is en hoe men daar achter komt. In welke geologische formatie(s) worden ze aangetroffen? Zijn er recente organismen die lijken op / verwant zijn aan / als nakomeling gezien worden van de organismen die als fossiel zijn aangetroffen? Wie heeft als eerste een beschrijving gepubliceerd?

Kies in overleg met je docent per groepje twee van de volgende groepen fossielen: *Ammonieten, Belemnieten, Trilobieten, Selaginella, Graptolieten, Pterosaurus, Zeeelie, Cycas, Stromatoliet, Archaeopterix, Mosasaurus, Mamuthus, Degenkrab, Coelacanth*. Een interessante video over reconstructies is *Verloren Wereld / Verdwenen levens - David Attenborough (deel 2, Bouwen met Botten)* BBC Natural History.

Donderdagmorgen bij geologie.

Prof Ossiel: ‘Met deze informatie kun je in een geologisch kolom angeven wanneer soorten voor het eerst verschijnen.’ Hij pakt een boek en bladert er in en laat de volgende pagina zien:



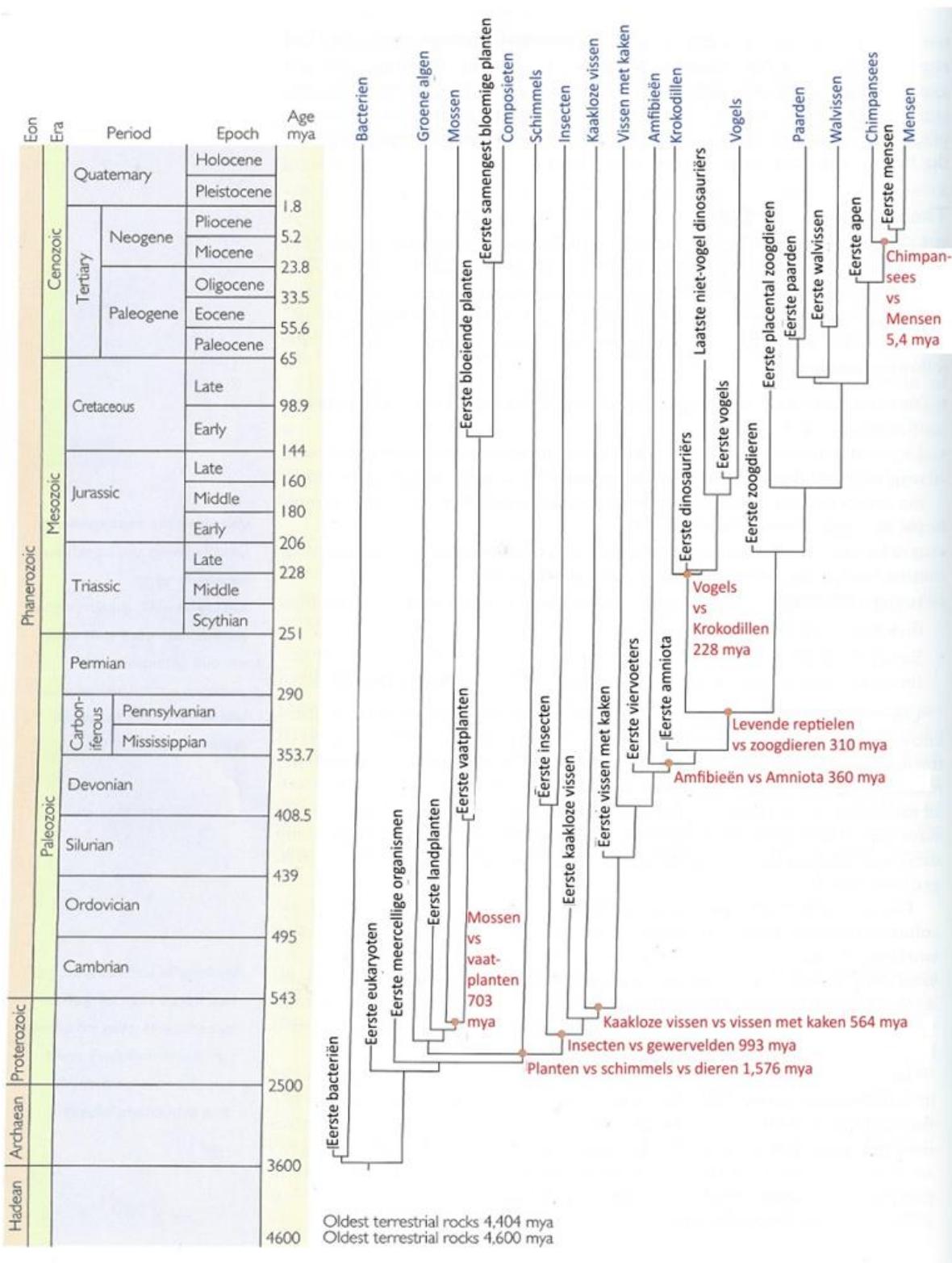
Figuur 20: Reconstructie van *Nothosaurus* sp.
Bron <http://en.wikipedia.org/wiki/Nothosaurus>



Figuur 21: Coproliet: een fossiele keutel (midden) in de kalksteen in Winterswijk



Figuur 22: Een fossiele vissenkop uit de groeve bij Winterswijk. Van elke levensvorm zijn reconstructies gemaakt zodat een beeld hoe die er kan hebben uitgezien. [te zien in Museum Frerik, Winterswijk]



Figuur 23: De geologische tijdschaal en evolutionaire stamboom.

De volgorde van tijdperken aan de linkerkant van het diagram werd bepaald door relatieve dateringtechnieken, daarnaast staat de absolute tijdschaal die later toegevoegd werd na het beschikbaar komen van radiometrische datering. De afkorting mya betekent millions of years ago. De evolutie boom aan de rechterkant bevat enkele belangrijke fossielen (in zwart). De vertakkingstijden gemarkeerd met rode stippen zijn schattingen gebaseerd op genetische data. (Uit: Evolutionary Analysis, Scott Freeman en John C. Herron).

'Kijk: ca. 230 miljoen jaar geleden kwam de splitsing tussen de voorlopers van krokodillen en dinosauriërs, aan het eind van het midden Trias, de periode waar jouw fossiele Myophoria wordt gevonden. En bij ca. 160 miljoen zie je de eerste vogels, waarvan Archaeopteryx de bekendste is, staan.'

De beide Tommen bekijken het schema aandachtig.

'Ik weet dat walvissen zoogdieren zijn, maar volgens dit schema hebben paarden en walvissen een gemeenschappelijke voorouder. Hoe heeft men die link gelegd? Waar is dat op gebaseerd?' vraagt Tom.

'Ik kan je daar wel wat over vertellen, maar beter lijkt het me dat jullie dan een bezoek brengen aan de afdeling evolutiebiologie. Iemand die jullie daar veel over kan vertellen is Evelien Stam. Zij maakt gebruik van bioinformatica om evolutionaire stambomen in kaart te brengen.'



Figuur 24: Fossiel van Archaeopteryx (afgietsel) en een reconstructie ervan in Museon, Den Haag

Deel 3: Bij evolutiebiologie

Opzet van dit deel

De geschiedenis van het leven wordt onderzocht door naar DNA te kijken, de drager van alle erfelijke eigenschappen. Na een korte cursus over DNA gaan we naar de filogenie. Die gebruikt fossielen én gegevens uit DNA om stambomen op te stellen. De bioinformatica wordt bij dit werk uitgebreid toegepast om de enorme hoeveelheid genetische data op te zoeken en te vergelijken. Je gaat daar zelf ook mee aan de slag. Ter illustratie van de werkwijze in de evolutiebiologie is een artikel opgenomen over het onderzoek aan het ontstaan van de walvis.

Leerdoelen:

- Je kunt de betekenis uitleggen van DNA, replicatie en eiwitsynthese.
- Je kunt uitleggen wat de basis is van het Darwinisme en het Neodarwinisme.
- Je kunt aangeven hoe veranderingen kunnen ontstaan in het DNA.
- Je kunt globaal uitleggen hoe evolutionaire stambomen worden opgesteld met behulp van morfologie en informatie uit DNA.
- Je kunt met behulp van de navigatietool Navigene gebruik maken van een aantal databases en hulpmiddelen in de bioinformatica.
- Je kunt globaal uitleggen hoe met behulp van morfologie en informatie uit DNA de evolutionaire stamboom van de walvis is opgesteld.
- Je kunt globaal moeilijkheden aangeven die er zijn bij het opstellen van een evolutionaire stamboom.

Donderdagmiddag bij evolutiebiologie

'Heel mooi dat u even tijd kunt vrijmaken voor ons. Prof Ossiel heeft ons naar u verwezen.'

Oom Tom legt uit dat ze een fossiel hebben gevonden in Winterswijk en dat prof Ossiel vertelde dat het gesteente en het fossiel ca 240 miljoen jaar oud zijn.

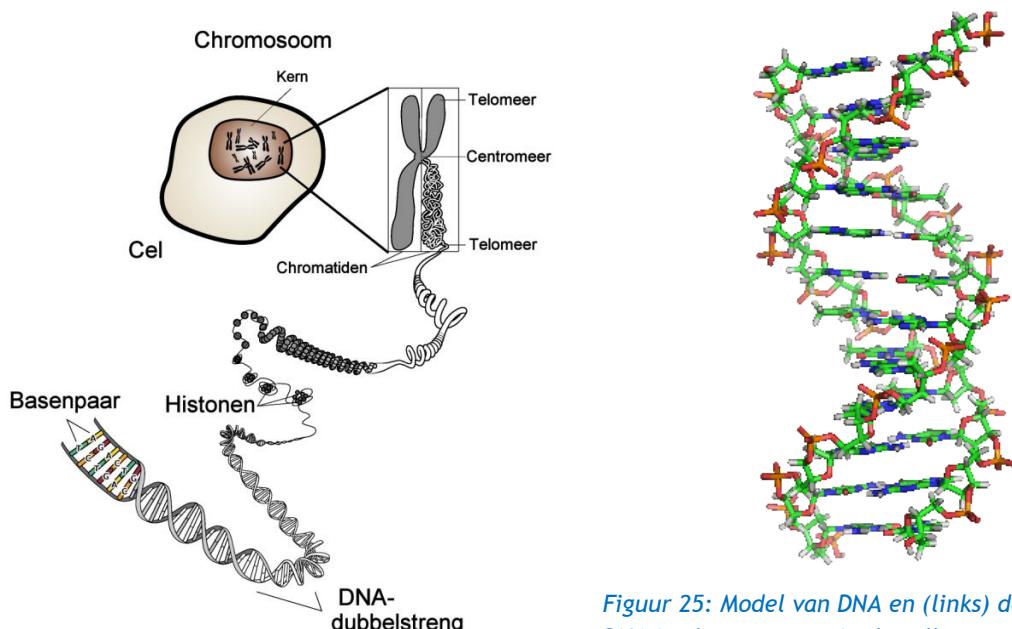
En dat hij een overzicht liet zien van de geologische kolom met daarin aangegeven wanneer bepaalde fossielen voor het eerst zijn verschenen.

'We willen graag weten hoe men tot een evolutionaire stamboom komt. Fossielen vinden, ok. Radiometrische dateringen, ok. Maar hoe wordt nu een link gelegd tussen de verschillende soorten?' zegt Tom.

'We zagen in het schema dat walvissen en paarden een gemeenschappelijk voorouder hebben. Hoe is dat bepaald?'

Prof Evelien Stam vraagt aan Tom of hij op school biologie heeft.

Dat heeft Tom. 'Dan hoef ik je dus niets meer te vertellen over DNA, evolutie en Darwin.' Tom begint een beetje te lachen. 'Ok, dan beginnen we toch daarmee'



Figuur 25: Model van DNA en (links) de vouwing van DNA in chromosomen in de celkern

6 DNA

In cellen van planten en dieren zit een mechanisme dat zorgt voor het aanmaken van eiwitten. Die zijn voor allerlei processen die in een cel plaatsvinden nodig.

Hoe worden deze eiwitten gevormd?

En bij een deling van cellen, verdubbeling van cellen, hoe weten dochtercellen hoe zij de eiwitten kunnen aanmaken? En hoe worden eigenschappen overgedragen van de ene generatie op de andere?

Halverwege de 20^e eeuw ontdekten wetenschappers dat DNA (Deoxyribonucleic acid) hierin een belangrijke rol speelt. Bij het maken van eiwitten en bij het overdragen van eigenschappen aan dochtercellen.

Vier wetenschappers waren betrokken bij het vinden van de structuur van DNA. James D. Watson, Francis Crick, Maurice Wilkins en Rosalind Franklin. In 1953 kwamen de eerste twee met het model van de zogenaamde dubbele helix.

DNA is een lange molecuul, dat uit twee tegenover elkaar liggende helften bestaat.

Het DNA in een cel zit ingepakt in chromosomen. In ons lichaam bevatten elk cel 46 chromosomen en dus ook 46 DNA moleculen. Deze chromosomen bevatten genen.

Een gen kan vertaald worden in een eiwit, wat vervolgens gebruikt wordt in allerlei lichamelijke processen. Zo kan een gen verantwoordelijk zijn voor de kleur van de ogen.

Opdracht 31. Chromosomen en DNA

- a. Maak een begrippenlijst van de volgende begrippen: chromosoom, gen, allel, meiose, mitose, heterozygoot, homozygoot, genotype en fenotype

(Maak een tabel en zet in de eerste kolom het begrip en in de tweede kolom de

betekenis, bijv chromosoom - drager van het erfelijk materiaal).

Ga voor informatie naar www.e-klassen.nl. Kies in het menu Modules. Ga vervolgens naar NLT Bio-informatica. En kies dan in het menu Lesmateriaal. Lees de informatie in hoofdstuk 1. De vragen kun je overslaan.

Chromosomen zijn opgebouwd uit DNA. Maar hoe ziet het DNA er uit? Uit welke onderdelen is het opgebouwd? En hoe ontstaat een dubbele helix?

b. Ga weer naar www.e-klassen.nl (zie ook opdracht 15). Kies in het lesmateriaal hoofdstuk 2 en lees de informatie over bouw DNA. En voeg toe aan je begrippenlijst de volgende begrippen: DNA, nucleotide, base, sequencing.

6.1 Replicatie

We weten nu al het een en ander over genen en DNA. Maar hoe wordt DNA nu verdubbeld bij een celdeling?

Opdracht 32: DNA replicatie

Ga weer naar www.e-klassen.nl (zie ook opdracht 15) Kies in het lesmateriaal hs 3 en lees de informatie over DNA replicatie. En voeg toe aan je begrippenlijst de volgende begrippen: replicatie, Okazaki-fragment, mutatie en PCR.

6.2 Eiwitsynthese

En hoe worden nu de eiwitten gemaakt? Hoe worden genen vertaald in eiwitten?

Opdracht 33: Genexpressie

a weer naar www.e-klassen.nl (zie ook opdracht 15) Kies in het lesmateriaal hs 4 en lees de informatie over genexpressie. En voeg toe aan je begrippenlijst de begrippen: mRNA, tRNA, codon, transcriptie, translatie, exon, intron, aminozuur en eiwit.

Opdracht 34: Conceptmap DNA

Ga weer naar www.e-klassen.nl (zie ook opdracht 15) Kies in het lesmateriaal hs 5 En maak zoals aangegeven staat een conceptmap DNA

Donderdagmiddag bij evolutiebiologie.

Goed de basis is gelegd, nu komen we vervolgens bij Darwin. De grondlegger van de evolutietheorie.'

7 EVOLUTIETHEORIE

7.1 De evolutietheorie van Darwin en het Neodarwinisme

In 1859 verscheen het boek *On the origin of species by means of natural selection* van Charles Darwin. Hierin beschreef Darwin zijn theorie over het ontstaan van soorten: afstamming van gemeenschappelijke voorouders door aanpassingen, via natuurlijke selectie.

Individuen planten zich voort en hun nakomelingen vertonen meer of minder variatie. De nakomelingen die overleven en zich weer kunnen voortplanten zijn meer succesvol (hebben een hogere *fitness*) dan nakomelingen die zich niet voortplanten. Na een groot aantal generaties kan een groep individuen zodanig verschillen van de oorspronkelijke individuen dat een nieuwe soort is ontstaan. Dit wordt evolutie genoemd. Als de nieuwe populatie zich niet meer kan voortplanten met de oorspronkelijke populatie is er een nieuwe soort ontstaan.

Darwin stelde het volgende:

- Individuen in populaties zijn gevarieerd
- De variatie wordt deels overgedragen van ouders op kinderen
- In elke generatie heeft het ene individu meer succes in overleven en voortplanting dan het andere
- Het overleven en voortplanten van individuen is niet een willekeurig proces; zij die beter overleven en zich voortplanten gaan een steeds groter deel van de soort uitmaken (natuurlijke selectie)

In het Neodarwinisme (de *moderne synthese*) wordt de theorie van Darwin gecombineerd met de genetica (erfelijkheidsleer). Hierin wordt beschreven hoe erfelijke eigenschappen worden doorgegeven via genen.

In de vier postulaten van Darwin komen dan vervolgens termen voor als genetisch, allele, mutatie.

7.2 Veranderingen in het DNA

Mutaties in het DNA kunnen voor veranderingen zorgen. Dit kan op verschillende manieren plaats vinden.

Bij de verdubbeling van het DNA voorafgaand aan de celdeling kunnen fouten optreden.

Het DNA kan bijvoorbeeld beschadigd worden door UV-straling of roken.

Als dergelijke fouten optreden bij de vorming van geslachtscellen, zullen deze doorgegeven worden aan de nakomelingen.

De volgende mutaties kunnen optreden:

- Een nucleotide kan vervangen zijn door een andere nucleotide (puntmutatie)
- Eén of meerdere nucleotiden zijn verdwenen (deletie)
- Eén of meer extra nucleotiden zijn ingevoegd (insertie)

Naast mutaties in een gen kunnen er ook andere veranderingen plaats vinden.

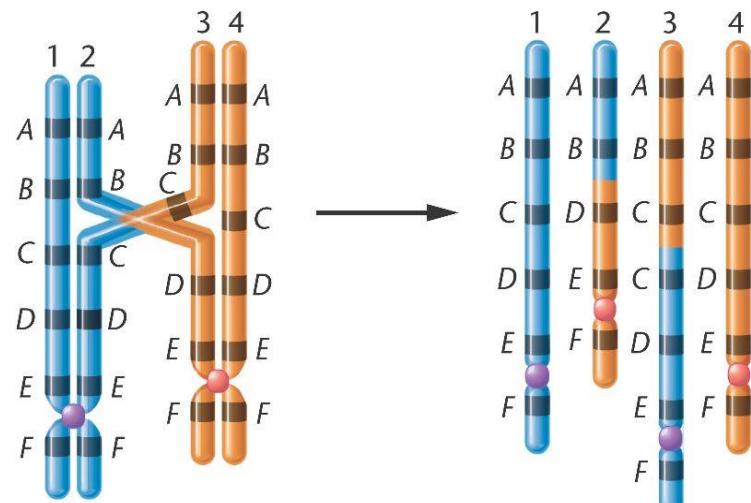
Zoals bijvoorbeeld genverdubbeling door *retrotranspositie* en *ongelijke crossing-over* bij meiose. Hierdoor komen hele stukken DNA op een andere plek terecht.

Dat kan door de volgende processen:

Bij *retrotranspositie* wordt eerst een stuk DNA (een retrotransposon) via transcriptie

omgezet in RNA. Als RNA heeft het geen intronen meer, alleen exonen. Door het enzym reverse transcriptase kan dit weer omgezet worden in DNA. En dit stuk DNA (zonder intronen) kan weer teruggeplaatst worden in het genoom op een nieuwe positie. Voorbeelden van retrotransposons zijn LINEs (bevatten zelf de code voor reverse transcriptase) en SINEs (bevatten niet zelf de code voor reverse transcriptase).

In het proces van meiose (produceren van voortplantingscellen) kan in het recombinatieproces een *ongelijke crossing-over* plaats vinden. Dit heeft als resultaat dat in een van de crossing-over producten een gen ontbreekt en in het andere hetzelfde gen twee keer voor komt. Zie figuur 26. En zelfs hele chromosomen of gedeeltes van chromosomen kunnen zich verdubbelen.



Figuur 26: Ongelijke crossing-over

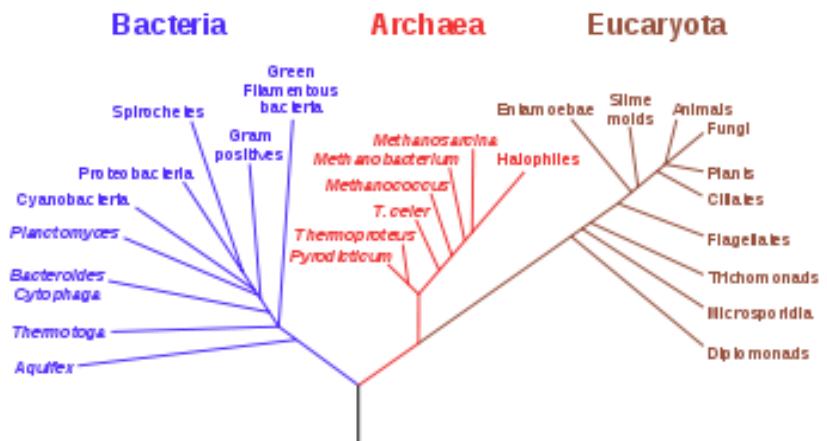
Opdracht 35. Chromosoomverdubbeling

Lees over het belang van chromosoomverdubbeling in bijvoorbeeld de plantenveredeling het artikel van Herman van Eck in Radix (*Fossielen in het DNA en hun betekenis voor het gesprek met creationisten*), in de map achtergrondinformatie.

- Wat is domesticatie?
- Hoe is het DNA van een tomaat aan dat van een aardappel gerelateerd?
- Wat is redundantie in een DNA-sequentie? Waarom is die er?
- Wat schrijft van Eck over de verhouding aap en mens op het niveau van DNA?

- Op blz 169 in zijn artikel beschrijft van Eck dat hij de neiging had om in Naturalis de glazen bol van het experiment van Harold Urey en Stanley Miller, als illustratie van de oersoep, aan scherven te slaan.

Phylogenetic Tree of Life



Figuur 27: De evolutionaire stamboom van het leven

Waarom? En schrijft van Eck verder ‘Wordt God hiermee verdedigd of is het de angst dat mijn geloof niets meer zou voorstellen als iemand morgen een experiment doet dat wel goede inzichten geeft in het ontstaan van het leven?’

Stel iemand doet een dergelijke experiment kun je dan zeggen dat je geloof niets meer voorstelt?

Donderdagmiddag bij evolutiebiologie

‘Er kan dus van alles hebben plaatsgevonden in het DNA: mutaties in een gen, verdubbeling van het gen, chromosoomverdubbeling.’

‘Maar hoe kom je daarachter?’ wil Tom weten.

Prof Stam antwoordt: ‘Van steeds meer soorten wordt het DNA gesequenced, ofwel de DNA-structuur in kaart gebracht. In 2006 was het genoom (het geheel aan chromosomen in een soort) van de mens in kaart gebracht.

Je kunt kijken naar de ontwikkeling van genen in de verschillende soorten.

En met behulp van verschillende technieken een evolutionaire verwantschap in kaart brengen. En zo komen tot een fylogenie. Dat is een beschrijving van hoe soorten zijn ontstaan uit andere. Deze wordt veelal grafisch weergegeven in een fylogenetische stamboom, een evolutionaire stamboom.’

Opdracht 36: DNA sequencing

Van steeds meer soorten wordt het DNA gesequenced.

Op www.ncbi.nlm.nih.gov/genomes/static/gpstat.html is te zien van hoeveel soorten het genoom volledig of gedeeltelijk in kaart is gebracht.

Ga naar de site. Wat is de huidige stand?

7.3 Afstamming in kaart brengen: fylogenie

‘Naast onderzoek van het DNA, kun je ook kijken naar bijvoorbeeld de morfologie van botten. Vroeger was het vergelijken van harde structuren van huidige organismen en fossielen de enig beschikbare methode om verwantschap in kaart te brengen. Nu kun je informatie uit DNA en fossielen beide gebruiken om verwantschap tussen soorten te vinden en zo een stamboom te maken die de evolutiegeschiedenis laat zien.

Het sequencen van DNA van nu levende soorten geeft inzicht in de meest recente takjes van de stamboom. We hebben geen DNA beschikbaar van soorten die alleen als fossiel bekend zijn. We missen veel informatie om een complete stamboom op basis van alleen DNA op te stellen. Ook het fossielenarchief kent leemtes.

Met zulk onderzoek kun je bijvoorbeeld ook zien dat de walvis en het nijlpaard een gemeenschappelijke voorouder hebben. Ik zal het toelichten.’

Fylogenie is de beschrijving van de evolutionaire geschiedenis van soorten. Het achterhaalt hoe groepen organismen zijn ontstaan uit andere groepen. En een fylogenetische boom geeft een grafische weergave hiervan.

Om soorten te kunnen indelen dient er een gelijkenis te zijn in kenmerken. Wanneer een gelijkenis een gevolg is van het afstammen van een gemeenschappelijke voorouder wordt dit *homologie* genoemd. Maar niet alle gelijke kenmerken zijn homoloog.

Een voorbeeld zijn de ogen bovenop de schedel bij krokodillen en nijlpaarden. Dit is geen erfenis van een gemeenschappelijke voorouder. Dit wordt verklaard door natuurlijke selectie, waardoor vergelijkbare structuren ontstaan als oplossingen voor problemen die optreden in een gelijksoortige omgeving. Dit wordt *convergente evolutie* genoemd. En wanneer op moleculaire schaal een mutatie weer wordt teruggedraaid kan er een gelijkenis optreden op moleculair niveau tussen soorten. Ook dit wordt dan niet gerekend als homoloog, maar heet *omkering* (reversal). Convergente evolutie en omkering worden samen gebracht onder de noemer *homoplasie*. Wanneer een gelijkenis in kenmerken niet een gevolg is van homologie wordt het gerekend tot homoplasie. Hoe kun je nu bij het maken van een evolutionaire stamboom onderscheid maken tussen homologie en homoplasie?



Figuur 28: Convergente evolutie: plaats van de ogen bij nijlpaard en krokodil

Als er bij het afleiden van een fylogenetische boom meerdere mogelijkheden zijn wordt gekozen voor die versie waarbij het totaal aan evolutionaire veranderingen zo laag mogelijk is.

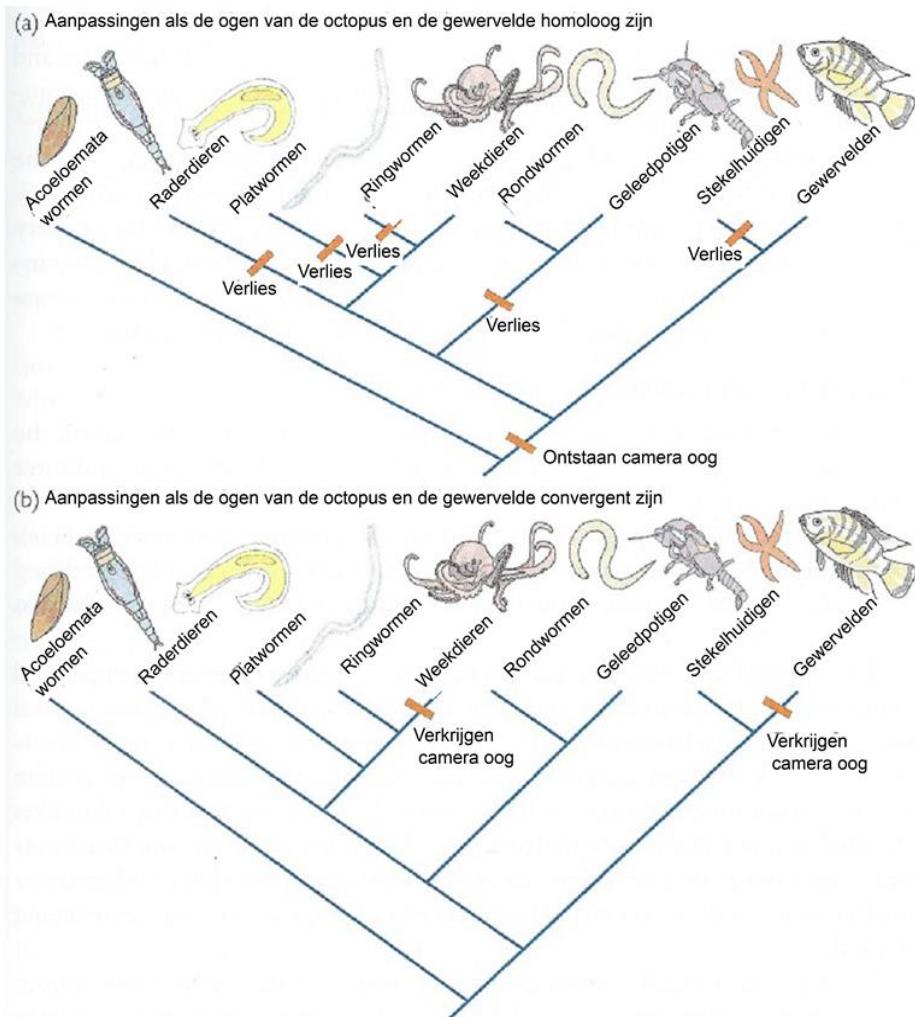
In de wetenschap is een algemeen geldend criterium dat als er voor een verschijnsel twee mogelijke verklaringen zijn, gekozen wordt voor die verklaring waarvoor de minste aannames nodig zijn. Dit heet *parsimonie*. Een andere benaming is *Ockhams scheermes*, toegeschreven aan een Engelse filosoof uit de 14^e eeuw Willem van Ockham. Het 'scheermes' symboliseert het wegscheren van alle onnodige ingewikkeldheden om bij de eenvoudigste verklaring uit te komen.

Zoals al aangegeven wordt met homologie bedoeld dat een gelijkenis in kenmerken een gevolg is van het afstammen van een gemeenschappelijke voorouder. Wanneer ze bruikbaar zijn in het samenstellen van een fylogenie (evolutionaire stamboom) worden ze synapomorfies genoemd. Een *synapomorfie* is dus een gelijksoortig kenmerk van soorten, omdat de gemeenschappelijke voorouder dit kenmerk ook voor het eerst had. Aan de hand van synapomorfies worden monofyletische groepen bepaald.

Een monofyletische groep bestaat uit een voorouder en al zijn nakomelingen.

Monofyletische groepen worden ook wel clades genoemd. Een *cladogram* is een fylogenetische boom die is samengesteld door synapomorfies samen te voegen.

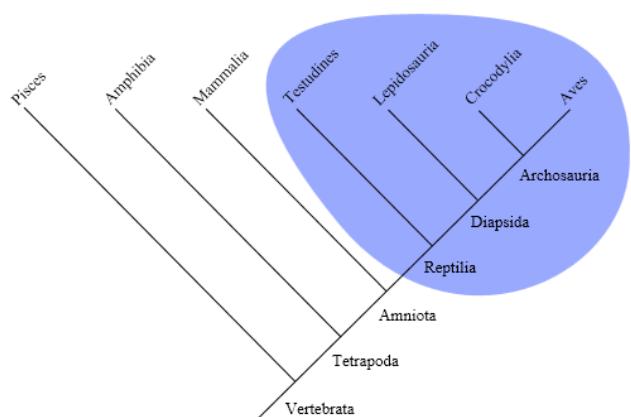
Figuur 29: De ontwikkeling van het oog, als voorbeeld om homoplasie van homologie te onderscheiden door de eenvoudigste verklaring te zoeken. De afgebeelde stambomen zijn bepaald door een groot aantal gelijksoortige kenmerken in DNA sequences te gebruiken. (a) Als de camera ogen van octopussen (weekdieren) en gewervelden (vertebrates) homoloog zijn, dan hebben er zes evolutionaire veranderingen plaatsgevonden, zoals aangegeven in de figuur. (b) Als de camera ogen van octopussen en gewervelden convergent zijn, dan hebben er twee evolutionaire veranderingen plaatsgevonden, zoals aangegeven in de figuur. (Uit Evolutionary Analysis, Scott Freeman en John C. Herron)



In figuur 30 is het blauwgekleurde een clade of monofyletische groep.

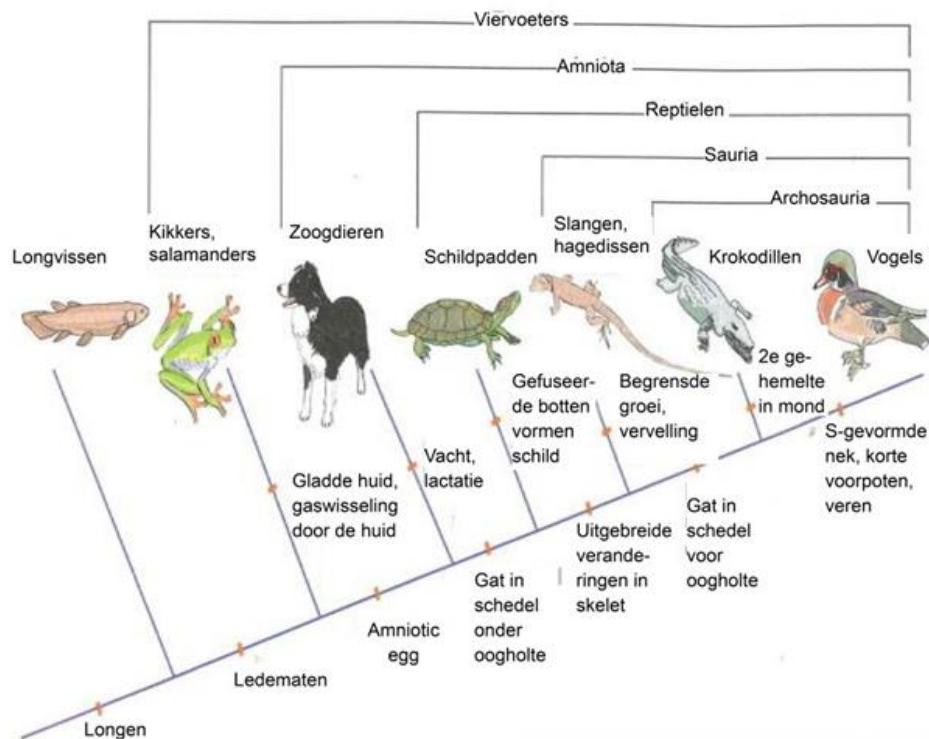
Een methode om een cladogram af te leiden is de outgroup analyse. Hierbij wordt de te onderzoeken groep (de ingroup) vergeleken met een eerdere afsplitsing (de outgroup)

Een mooi voorbeeld van een boom met synapomorfies is te zien in onderstaande figuur. In de monofyletische groep viervoeters (tetrapoda) zijn vogels een afzonderlijke monofyletische groep, met bijvoorbeeld veren als gedeelde synapomorfie.



Figuur 30: Een clade (het blauwgekleurde deel)

Figuur 31: *Synapomorfies onthullen de relaties tussen viervoeters. De kenmerken die aangegeven zijn bij elk rode markeringsteken in de boom zijn synapomorfies gedeeld door de soorten boven dat punt.*
Bijvoorbeeld, vogels hebben veren en andere gedeelde, afgeleide kenmerken die men aantreft bij vogels. Maar ze hebben ook vier ledematen die hen identificeren als een lid van de monofyletische groep van Tetrapoda (viervoeters). (Uit Evolutionary Analysis, Scott Freeman en John C. Herron)



8 BIOINFORMATICA

8.1 Databanken

Een fylogenetische boom kan worden gemaakt door moleculaire kenmerken van soorten te vergelijken. Hierbij kan gebruik gemaakt worden van verschillende methodes zoals Parsimony, maximum likelihood (ML), Bayesian Markov Chain Monte Carlo (BMC) en de distance method. Deze methoden worden uitgelegd en toegepast in hoofdstuk 10, bij het opstellen van de fylogenie van de walvis.

Maar voordat deze methoden gebruikt kunnen worden dient er natuurlijk wel iets vergeleken te kunnen worden. In deze paragraaf gaan we zelf eiwitten en genen vergelijken en een fylogenetische boom bepalen.

Er zijn via internet databanken te benaderen met gegevens over genen en eiwitten. Zoals van het Amerikaanse National Center for Biotechnology Information (NCBI) en van het European Bioinformatics Institute (EBI).

Nederland kent een eigen bioinformatica instituut ter bevordering van het onderzoek in Nederland, namelijk het Netherlands Bioinformatics Centre (NBIC).

Het vergelijken van de nucleotidenvolgorde van twee stukken DNA of het vergelijken van de eiwitsequenties wordt alignen (het op een rij plaatsen) genoemd.

Een algoritme dat gebruikt wordt voor het vergelijken van een opgegeven DNA- of eiwitsequentie met wat aanwezig is in een database is de Basic Local Alignment Search Tool (BLAST).

Wil je meerdere opgegeven sequenties met elkaar vergelijken dan kun je onder andere gebruik maken van een tool als ClustalW2 van het EBI.

Sequenties van DNA, RNA, eiwitten etc. worden in via internet te benaderen databases opgeslagen en beschikbaar gesteld in het zogenaamde FASTA (FAST_Alignment) format.

Een aminozuur- of nucleotidenvolgorde in FASTA format bestaat uit:

Een header: één regel beginnend met een ">" teken, gevolgd door een identificatiecode. Soms gevolgd door een korte beschrijving.

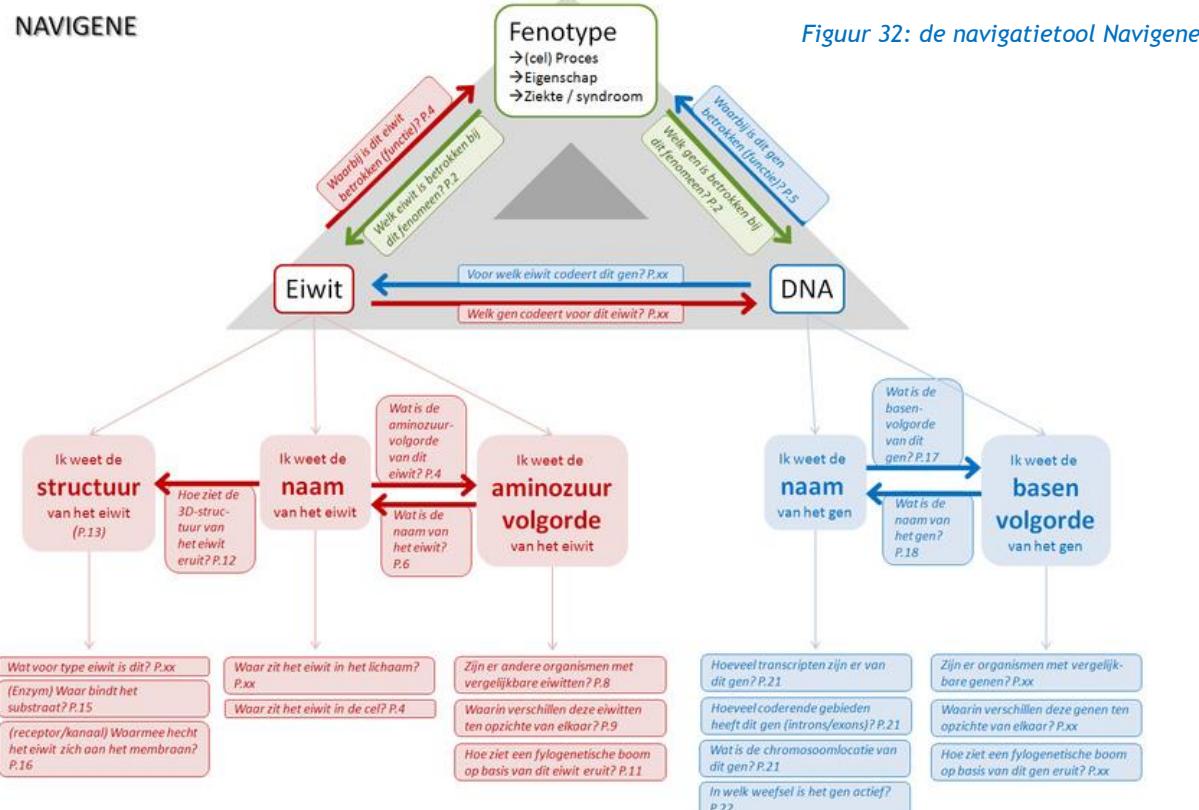
Een of meerdere regels met de sequentiedata: de aminozuur- of nucleotidenvolgorde.

Een bestand in FASTA format kan meer dan één sequentie bevatten, elk met een eigen header.

Op nl.wikipedia.org/wiki/Bio-informatica wordt een overzicht gegeven van gebruikte software en databanken.

8.2 Navigatietool Navigene

Het Nederlandse NBIC heeft samen met het Freudenthal Instituut voor Didactiek van Wiskunde en Natuurwetenschappen een navigatietool ontwikkeld voor gebruik in de complexe wereld van databases en tools in de bioinformatica, Navigene.



Om een indruk te krijgen van de mogelijkheden in de bioinformatica gaan we met behulp van Navigene een aantal opdrachten doen.

Opdracht 37: Het grootste menselijke eiwit, *titine*

Zoek de functie, aminozuurvolgorde en locatie in de cel van het grootste eiwit in ons lichaam maar eens op: titine (Engels titin).

Maak hiervoor gebruik van de zoektool MRS van de Radboud Universiteit in Nijmegen (via mrs.cmbi.ru.nl)

Voer in het zoekveld de Engelse naam van het eiwit in. Zoek in database Swiss-Prot. Klik op de juiste hit (titin_human) en scroll naar de juiste informatie. Zie voor meer informatie pag 4 van Navigene, te vinden in de map *achtergrondinformatie voor leerlingen*.

Opdracht 38: Naam van een eiwit zoeken

Wat is de naam van het eiwit? Ga naar het programma BLAST op de website mrs.cmbi.ru.nl. Kopieer onderstaande aminozuurvolgorde (de éénletter code voor aminozuren wordt gebruikt) in het scherm. Kies als databank weer voor Swiss-Prot en klik op Run Blast. Onder Blast results klik je op het gevonden resultaat. Klik op de ID-code van de bovenste ‘hit’. Geef de eiwitnaam (*Protein name*), herkomst (*From*), functie (onder *Comments, function of catalytic activity*).

Zie voor meer informatie pag 6 en 7 van Navigene.

```
>Protein1
QYSSNTQQGR TSIVHLFEWR WVDIALECER YLAPKGFGGV QVSPPNENVA IHNPFPRPWWE
RYQPVSYKLC TRSGNEDEFR NMVTRCNNVG VRIYVDAVIN HMCGNAVSAG TSSTCGSYFN
PGSRDFPAVP YSGWDFNDGK CKTGSGDIEN YNDATQVRDC RLSGLLDLAL GKDYVRSKIA
EYMNHLIDIG VAGFRIDASK HMWPGDIKAI LDKLHNLNSN WFPEGSKPFI YQEVIDLGGE
PIKSSDYFGN GRVTEFKYGA KLGTIVRKWN GEKMSYLNKW GEGWGFMPSD RALVFVDNHD
NQRGHGAGGA SILTFWDARL YKMAVGFMIA HPYGFTRVMS SYRWPRYFEN GKDVNWDVGP
PNNDNGVTKEV TINPDTCGN DWVCEHRWRQ IRNMVNFRNV VDGQPFTNWY DNGSNQVAFG
RGNRGFIVFN NDDWTFSLTL QTGLPAGTYC DVISGDKING NCTGIKIYVS DDGKAHFSIS NSAEDPFIAI HAESKL
```

Opdracht 39: Hemoglobine

Ga de beta-subunit van gezond hemoglobine vergelijken met die van een sikkcelanemie- patiënt. We gaan nu gebruik maken van ClustalW2 van het EBI. Ga hiervoor naar www.ebi.ac.uk/Tools/clustalw2/index.html

Plak de onderstaande verschillende aminozuurvolgordes in het tekstveld en klik op ‘Submit’ Bekijk via JalView (via Result Summary) welk aminozuur gemuteerd is. Zie voor meer informatie pag 9 en 10 van Navigene.

Drie opmerkingen bij het gebruik van ClustalW2:

- Voor gebruik van JalView en Guide Tree dient Java (Java Runtime Environment (JRE) op je computer te staan. Is dit niet het geval ga dan naar de website Java.com en installeer de gratis Java-download.

- Bij gebruik van de browser Internet Explorer kan soms een probleem optreden bij openen van een menu met de rechtermuisknop. Dan is het raadzaam gebruik te maken van een andere browser, zoals Firefox of Chrome. Kopiëer de URL dan in het zoekvenster van de browser en start opnieuw.
- Er wordt aangegeven: ClustalW2 is no longer being maintained. Please consider using the new version instead: [Clustal Omega](#). Dit nieuwe programma mag je ook gebruiken, geeft hetzelfde resultaat als ClustalW2.

>Hemoglobin_beta_subunit

```
VHLTPEEKSAVTALWGKVNDEVGGEALGRLLVVYPWTQRFFESFGDLSTPDAMGNPKV  
KAHGKKVLGAFSDGLAHLDNLKGTFATLSELHCDKLHVDPENFRLGNVLVCVLAHHFGK  
EFTPPVQAAYQKVAVANALAHKYH
```

>Hemoglobin_beta_subunit_sickle_cell_disease

```
VHLTPVEKSAVTALWGKVNDEVGGEALGRLLVVYPWTQRFFESFGDLSTPDAMGNPKV  
KAHGKKVLGAFSDGLAHLDNLKGTFATLSELHCDKLHVDPENFRLGNVLVCVLAHHFGK  
EFTPPVQAAYQKVAVANALAHKYH
```

Opdracht 40: Myoglobine

Hoe ziet een fylogenetische boom op basis van het eiwit myoglobine eruit voor de soorten: mens, konijn, haai, tonijn, gibbon, baviaan, karper en zebra? Gebruik onderstaande code.

Maak weer gebruik van ClustalW2 van het EBI. Niet van Clustal Omega, geeft geen Guide Tree.

Wanneer je klikt op Guide Tree wordt standaard Phyogram Tree getoond. Je kunt ook kiezen voor Cladogram Tree. Bij het maken van de bomen worden verschillende optimalisatie methodes gebruikt. In Jalview kun je onder menu-optie Calculate ook kiezen voor verschillende optimalisatie methodes.

Toon de boom als Phyogram Tree met Distances. Maak met PrintScr een afdruk van het scherm.

Zie voor meer informatie pagina 11 van Navigene.

>mens

```
MGLSDGEWQL VLNVWGKVEA DIPGHGQEVL IRLFKGHPET LEKFDKFKHL KSEDEMKA  
DLKKHGATVL TALGGILKKK GHHEAEIKPL AQSHATKHKI PVKYLEFISE CIIQVLQSKH  
PGDFGADAQG AMNKALELFR KDMASNYKEL GFQG
```

>konijn

```
MGLSDAEWQL VLNVWGKVEA DLAGHGQEVL IRLFHTHPET LEKFDKFKHL KSEDEMKA  
DLKKHGNTVL TALGAILKKK GHHEAEIKPL AQSHATKHKI PVKYLEFISE AIIHVLHSKH  
PGDFGADAQA AMSKALELFR NDIAAQYKEL GFQG
```

>haai

```
MABWDKVNSV WSAVEQNITA IGQNILLRLF EQYPESEDYF PKLKNNKSLGE LKDTADIKAQ  
ADTVLRALGN IVKKKGDHQS PVKALAATHI TTHKIPPHYF TKITTIAVGV LSEMYPSEMN  
AQAQAAFGA FKNICSDIEK EYKAANFQG
```

>tonijn

```
MADFDAVLKC WGPVEADYTT MGGLVLTRLF KEHPETQKLF PKFAGIAQAD IAGNAAISAH  
GATVLKKLGE LLKAKGSHAA ILKPLANSWA TKHKIPINNF KLISEVLVKV MHEKAGLDAG
```

GQTALRNVVMG IIIADLEANY KELGFSG

>gibbon

MGLSDGEWQL VLNVWGKVEA DIPSHGQEVL IRLFKGHPET LEKFDKFHKL KSEDEMKA
DLKKHGATVL TALGGILKKK GHHEAEIKPL AQSHATKHKI PVKYLEFISE CIIQVLQSKH
PGDFGADAQG AMNKALELFR KDMASNYKEL GFQG

>baviaan

MGLSDGEWQL VLNVWGKVEA DIPSHGQEVL IRLFKGHPET LEKFDKFHKL KSEDEMKA
DLKKHGATVL TALGGILKKK GHHEAEIKPL AQSHATKHKI PVKYLELISE SIIQVLQSKH
PGDFGADAQG AMNKALELFR NDMAAKYKEL GFQG

>karper

MHDAELVLKC WGGVEADFEG TGGEVLTRLF KQHPETQKLF PKFVGIASNE LAGNAAVKA
GATVLKKLG E LLKARGDHAA ILKPLATTHA NTHKIALNNF RLITEVLVKV MAEKAGLDAG
GQSALRRVMD VVIGDIDTYY KEIGFAG

>zebra

MGLSDGEWQQ VLNVWGKVEA DIAGHGQEVL IRLFTGHPET LEKFDKFHKL KTEAEMKA
DLKKHGTVVL TALGGILKKK GHHEAEIKPL AQSHATKHKI PIKYLEFISD AIIHVLHSKH
PGDFGADAQG AMTKALELFR NDIAAKYKEL GFQG

Opdracht 41: 3D structuur

Er zijn verschillende manieren om eiwitten te visualiseren in 3D-formaat.

Een mogelijkheid is bijvoorbeeld met het programma Jmol. Op websites wordt dit wel gebruikt om de 3D-structuur te geven.

Voor een weergave van Jmol ga naar de volgende website:

www.rcsb.org/pdb/101/structural_view_of_biology.do

Choose a molecule from the list in het menu rechtsboven. Bijvoorbeeld hemoglobin.

En kies (een van de) discussed structures.

Exporteer via de rechtermuisknop een jpg afbeelding van de weergegeven 3D-structuur van hemoglobin in Jmol.

Een heel mooi programma om eiwitten te visualiseren is ook het gratis te downloaden Yasara. Zie hiervoor pagina 12 t/m 17 van Navigene

Opdracht 42: Naam van het gen zoeken

Wat is de naam van het gen?

Ga nu naar de website <http://www.ensembl.org/Multi/blastview>

Kopieer onderstaande basenvolgorde in het scherm en klik op RUN. Bekijk de contigview van de bovenste 'hit' om het gen te achterhalen. Kijk op pag 21 en 22 van Navigene hoe je dit kunt doen. Wat is de naam van het gen? En geef de locatie.

>Basenvolgorde1

ATGGAGGAGCCGCAGTCAGATCCTAGCGTCGAGCCCCCTTGAGTCAGGAAACATTTCA
GAGCCTATGGAAACTACTTCCCTGAAAACAACGTTCTGCCCCCTGCCGTCCAAGCAATGGATGA
TTTGATGCTGTCCCCGGACGATATTGAACAATGGTTCACTGAAGACCCAGGTCCAGATGAAGC
TCCCAGAACATGCCAGAGGGCTGCTCCCCCGTGGCCCCCTGCACCAGCAGCTCCTACACCGGGCG
CCCCCTGCACCAGCCCCCTCTGGCCCCCTGTCATCTCTGTCCCTCCAGAAAACCTACCAGG

GCAGCTACGGTTCCGCTGGGCTTGCATTCTGGGACAGCCAAGTCTGTGACTTGAC
TACTCCCCTGCCCTCAACAAGATGTTTGCCTGGCAAGACCTGCCCTGTGCAGCTGTGG
GTTGATTCCACACCCCCGCCGGCACCGCGTCCGCCATGCCATCTACAAGCAGTCACAG
CACATGACGGAGGTTGTGAGGCGCTGCCCATGAGCGCTGCTCAGATAGCGATGGTCT
GGCCCTCCTCAGCATCTTATCCAGTGGAAAGGAATTGCGTGTGGAGTATTGGATGACA
GAAACACTTCGACATAGTGTGGTGCCTATGAGCCGCTGAGGTTGGCTGACTGT
ACCACCATCCACTACAACATACATGTGTAACAGTTCCATGGCGGCATGAACCGGAGGCC
ATCCTCACCATCATCACACTGGAAGACTCCAGTGGTAATCTACTGGGACGGAACAGCTTGAG
GTGCGTGTGCTGCCTGTCCTGGGAGAGACCGGCGCACAGAGGAAGAGAATCTCGCAAGAA
AGGGGAGCCTCACCACGAGCTGCCAGGGAGCACTAAGCGAGCACTGCCAACACACCA
GCTCCTCTCCCCAGCCAAGAAGAACCACTGGATGGAGAATATTCACCCCTCAGATCCGTG
GGCGTGAGCGCTTCGAGATGTTCCGAGAGCTGAATGAGGCCTTGGAACTCAAGGATGCCAG
GCTGGGAAGGAGCCAGGGGGAGCAGGCTCACTCCAGCCACCTGAAGTCCAAAAGGGTCA
GTCTACCTCCGCCATAAAAACATGTTCAAGACAGAAGGGCCTGACTCAGACTGA

Opdracht 43: Stamboom voor keratine

Maak eens een fylogenetische stamboom van het gen dat verantwoordelijk is voor haren: keratine (keratin).

Ga naar de genoombrowser: <http://www.ensembl.org/index.html>

Type de naam van het gen in het tekstveld. Bekijk een hit onder 'gene' in het gewenste organisme (bijvoorbeeld human). Selecteer Gene Tree (image) in het menu. NB Wanneer Gene Tree (image) niet geactiveerd is, neem dan een volgende hit. Maak een kopie van de tree.

Op deze website, waarbij onder andere weer het European Bioinformatics Institute (EBI) betrokken is, kun je van een aantal soorten het gehele genoom via een karyotype of karyogram bekijken en vervolgens op een gedeelte inzoomen. Via www.ensembl.org/info/about/species.html kun je zien welke soorten.

In de Gene Tree zie je de fylogenetische boom voor het gen dat je geselecteerd hebt. De samengevouwen subtrees kun je uitvouwen door er op te klikken en te kiezen voor expand. Klik je een soortnaam aan, dan kun je via het aanklikken van species naar meer informatie over de betreffende soort.

9 DE FYLOGENETISCHE BOOM VAN WALVISSEN

In het schema op blz 33 was te zien dat paarden en walvissen een gemeenschappelijke voorouder hebben. Hoe is nu de fylogenetische boom van walvissen bepaald? Dat wordt een lang verhaal.

Het nu volgende tot en met paragraaf 9.7 is een vrijwel volledige vertaling van paragraaf 4.2 *The Phylogeny of Whales* uit *Evolutionary Analysis* van Scott Freeman and Jon C. Herron. Zij geven aan de hand van de fylogenetische boom van walvissen een mooi

overzicht van verschillende technieken voor het samenstellen van een evolutionaire boom. En de problemen waar je tegen aan loopt.

Dit deel is een illustratie van de werkwijze van de moderne paleontologie. Er worden fossielen gebruikt, die met behulp van geologische informatie gedateerd worden. Tegelijk gebruikt men DNA-gegevens van verschillende nu levende diersoorten, zoals walvissen, paarden en nijlpaarden.

Opdracht 44: video's over evolutie van de walvis

Bekijk eerst de volgende twee video's

Richard Dawkins: Show me the intermediate fossils! (2:34)

Whale evolution (7:03)

9.1 Toegepaste methoden en technieken

Welk soort kenmerken kun je het best gebruiken: morfologische of moleculaire?

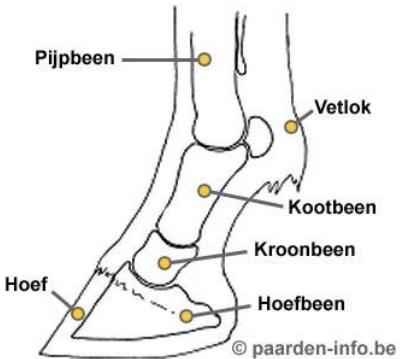
Beide hebben voor- en nadelen. Morfologische kenmerken zijn noodzakelijk wanneer naar soorten wordt gekeken die alleen als fossiel voorkomen. Een nadeel is dat voor de analyse vaak experts nodig zijn.

Analyse gebaseerd op moleculaire kenmerken heeft weer eigen voor- en nadelen. Een groot aantal nucleotiden in DNA kan tegenwoordig snel worden geanalyseerd. En met behulp van modellen kan worden geanalyseerd hoe verschillende DNA volgorden veranderen in de tijd. Met behulp van de modellen kan homoplasie worden geminimaliseerd en een nauwkeurige schatting worden gemaakt van de fylogenie gebaseerd op de data. Om fouten door reversal te voorkomen kan worden gezocht naar genen die in de tijd langzaam veranderen. Maar het is bijna onmogelijk om homoplasie in zijn geheel te voorkomen.

Omdat beide soorten kenmerken hun voor- en nadelen hebben, wordt vaak naar beide soort kenmerken gekeken. Dit is ook gebeurd bij het bepalen van de fylogenetische boom van walvissen.

9.2 Parsimonie aan de hand van een enkel morfologisch kenmerk

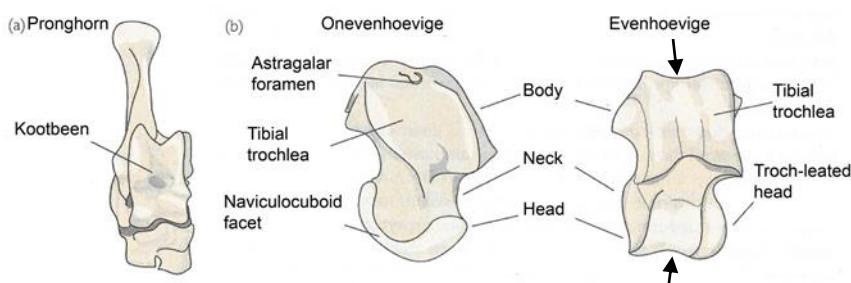
Gebaseerd op analyses van kenmerken van het geraamte vonden verschillende wetenschappelijke onderzoeken een nauwe verwantschap tussen walvisachtigen en hoefdieren. De hoefdieren bestaan uit twee belangrijke groepen. Paarden en neusdieren vormen de onevenhoevigen; de koeien, herten, nijlpaarden, varkens, navelzwijnen (pekari's, varkens-achtige wilde dieren in Noord- en Zuid-Amerika) en kamelen vormen de evenhoevigen.



Figuur 32: Bij evenhoevigen heeft het kootbeen een ongebruikelijke vorm: beide einden van het been zijn glad en hebben een soort inkeping als bij een katrol. Deze vorm geeft de voet de mogelijkheid om te draaien in een wijde boog aan het eind van de enkel en draagt bij aan de grote passen en het snel kunnen rennen van veel evenhoevigen. Zie ook onderstaande figuur.

Een hoef is een hoornen overdekking van het uiteinde van de voet. Het is in feite een vergrote en versterkte nagel. Van een hoef wordt gesproken als het de nagel is die bij het staan en lopen de grond raakt. De onevenhoevigen en evenhoevigen zijn beide monofyletische groepen - elk groep bestaat uit een gemeenschappelijke voorouder en al zijn nakomelingen.

De evenhoevigen worden onderscheiden als een monofyletische groep op grond van verschillende gelijksoortige morfologische kenmerken (morfologische synapomorfies). Tot deze synapomorfies behoren enkele schedel- en gebitskenmerken. Maar het duidelijkste gemeenschappelijke, afgeleide kenmerk wordt gevonden in de enkel. Dat is de astragalus of het kootbeen, dat het been met de voet verbindt.



Figuur 33: De astragalus is een synapomorfie die evenhoevigen definieert. (a) De astragalus, het kootbeen, is het hoogst liggende bot in de enkel, waardoor de voet vooruit en achteruit kan roteren. Een Pronghorn is een soort antilope, dus een evenhoevige. (b) De astragalus van een onevenhoevige (links) en van een evenhoevige (rechts). Duidelijk is bij de evenhoevige aan de boven- en onderkant (pijlen) een soort inkeping als bij een katrol te zien (Uit Evolutionary Analysis, Scott Freeman en John C. Herron)

De vraag is nu: hoe nauw verwant zijn de walvissen aan de evenhoevigen?

Zijn ze een nauw verwante *outgroup* of zijn ze een onderdeel van de clade of monofyletische groep? Specifieker, hoe aannemelijk is het dat walvissen en nijlpaarden een recente gemeenschappelijke voorouder hebben?

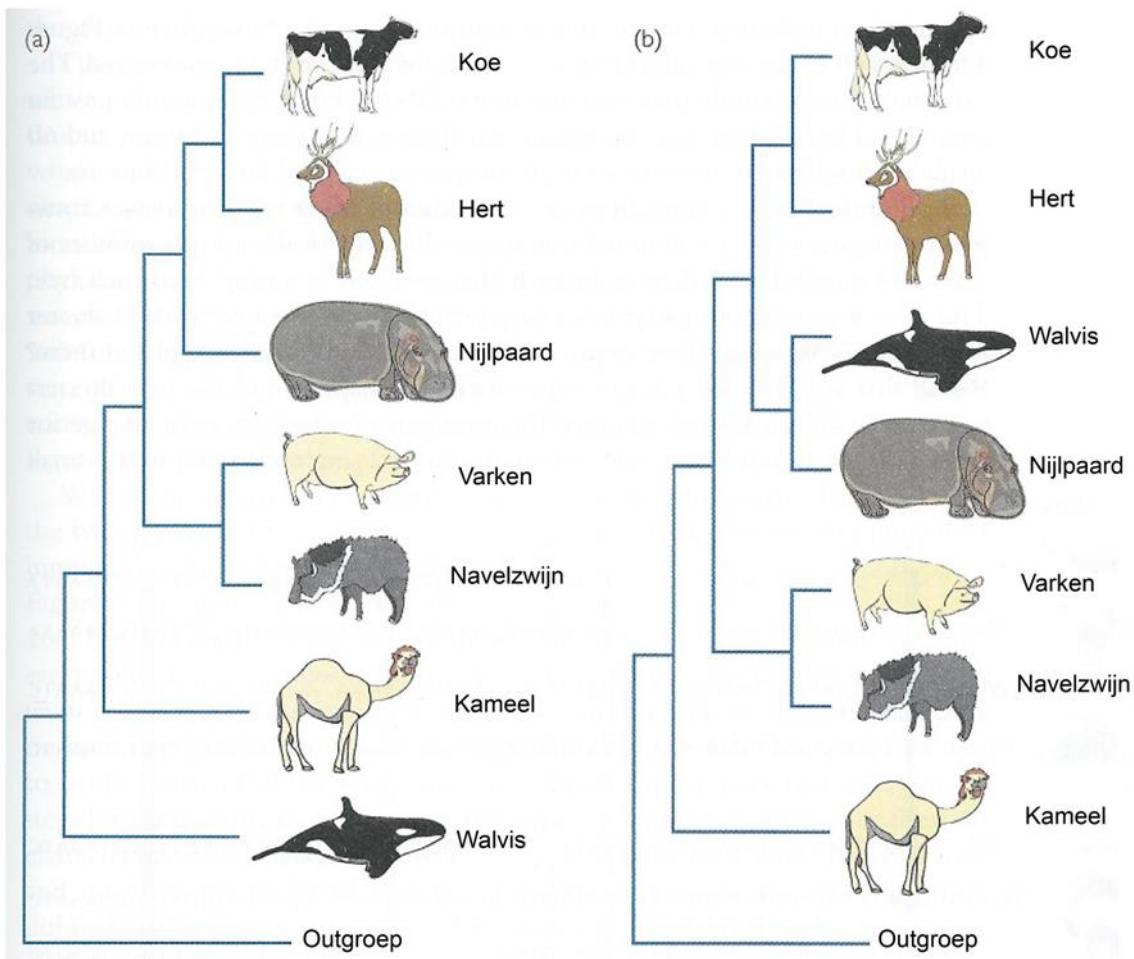
Een nijlpaard is het enige hoefdier dat een groot deel van de tijd in water doorbrengt.

Als walvissen nauw verwant zijn aan de nijlpaarden, is er een logisch evolutionair scenario mogelijk. Dat ziet er als volgt uit: na het uitsterven van de dinosauriërs en de grote zeereptielen, gingen sommige zoogdieren in ondiepe watergebieden wonen.

Na verloop van tijd verbleven walvissen volledig in het water, terwijl nijlpaarden deels in

het water verbleven. Een walvis-nijlpaard relatie betekent ook dat dieren als dolfijnen en bruinvissen nauw verwant zijn aan landdieren zoals herten, koeien en varkens.

Echter als gemeenschappelijk, afgeleid, kenmerk pleit de aanwezigheid van een evenhoevige astragalus (met aan de boven- en onderkant die inkeping) er juist voor dat walvissen en nijlpaarden niet nauw verwant zijn aan elkaar. Immers de nu levende walvissen hebben geen enkels en dus ook geen astragalus. Wanneer nijlpaarden en de andere evenhoevigen een monofyletische groep vormen, dan is de evenhoevige astragalus een keer geëvolueerd zonder verdere aanpassingen. Kijk hiervoor naar onderstaand figuur.



Figuur 34: Fylogenetische hypothese voor walvissen en andere zoogdieren. De boom in (a) laat de evenhoevige hypothese zien: walvissen en dolfijnen zijn gerelateerd aan de hoefdieren, mogelijk als zustergroep van de evenhoevigen. De outgroup bestaat uit onevenhoevigen. In (b) de walvis + nijlpaard hypothese. Het is gelijk aan (a) met één uitzondering: de tak die leidt tot de walvissen is verplaatst zodat walvissen de zustergroep van de nijlpaarden zijn. (Uit Evolutionary Analysis, Scott Freeman en John C. Herron)

Welke hypothese heeft de voorkeur? Teken in figuur 34 (a) maar eens een zwarte streep over de tak die leidt tot de gemeenschappelijke voorouder van alle evenhoevigen. Als walvissen een nauw verwante ‘zuster’ groep zijn van de nijlpaarden, dan zou het ontstaan van de evenhoevige astragalus gevuld zijn door een verlies van dit kenmerk in de

aftakking naar de walvissen. Dit wordt zichtbaar gemaakt in figuur 34 (b). Teken weer een zwarte streep over de tak die leidt tot de gemeenschappelijke voorouder van alle evenhoevigen. En een onderbroken streep langs de aftakking naar de walvissen. De zwarte streep stelt het verkrijgen van een kenmerk voor en de onderbroken streep vertegenwoordigt het verlies ervan.

Als je figuur a en b met elkaar vergelijkt dan heeft de walvis + nijlpaard hypothese in figuur b minder parsimonie (er zijn meer aannames nodig) dan de evenhoevige hypothese in figuur a. Want in figuur b is een extra stap nodig in de evolutie.

Dit soort afleidingen is de kern van een fylogenetische analyse gebaseerd op parsimonie. Je hebt twee alternatieve bomen met elkaar vergeleken en geconcludeerd dat de boom die de minste evolutionaire veranderingen nodig heeft de meest aannemelijke is.

Nu levende walvissen hebben geen enkels, dus de vorm van de astragalus van een walvis als een mogelijk evenhoevig kenmerk kan niet worden beoordeeld. Maar sommige walvisfossielen hebben nog wel achterste ledematen. In de jaren 90 van de vorige eeuw werden fossiele enkelbeenderen gevonden in dezelfde afzettingen die de oudste walvisfossielen bevatten. Ze werden vergeleken met de enkelbeenderen van levende en uitgestorven evenhoevigen. De onderzoekers concludeerden dat sommige kenmerken van de astragalus (met aan de boven- en onderkant die inkeping), in feite worden gevonden in de vroegste walvissen. Hun gegevens ondersteunen de hypothese dat walvissen afstammen van een evenhoevige voorouder. Hun vondst was echter omstreden. Critici deden de suggestie dat de beenderen die waren gevonden mogelijk toebehoorden aan een andersoortige evenhoevige - niet aan een walvis - en benadrukte dat een meer algemene analyse van veel morfologische kenmerken de walvissen uitsloten van de evenhoevigen. Geconfronteerd met tegenstrijdige gegevens zoals deze, kunnen evolutiebiologen weinig anders dan er andere soorten gegevens bij betrekken.

9.3 Parsimonie met vele moleculaire kenmerken

Onderzoekers hebben eind jaren negentig de evolutionaire geschiedenis van walvissen geanalyseerd door de DNA volgorde te verzamelen van vier walvissoorten, acht soorten evenhoevigen waaronder een nijlpaard en een outgroup van een onevenhoevige. In onderstaande figuur zijn 60 kenmerken van hun dataset te zien, van acht betrokken soorten. De gegevens zijn van de nucleotide posities 141-200 in de DNA volgorde van een gen voor melkeiwit, genoemd beta-caseïne. In de volgende discussie wordt deze informatie gebruikt om te illustreren hoe veel kenmerken worden geanalyseerd onder parsimonie.

Om de beste fylogenetische boom te vinden uit de DNA gegevens of andere soorten kenmerken, gaat een computer veel of alle mogelijk bomen genereren die mogelijk zijn voor de onderzochte soorten. En gaat vervolgens elk kenmerk, een per keer, op elke mogelijke boom in kaart brengen. Het patroon van verandering in een kenmerk met de meeste parsimonie wordt genoteerd voor elk kenmerk op elke mogelijke boom. Hoewel

*Figuur 35: Sequence data voor parsimonie analyse. Deze data zijn 60 nucleotiden van aligned sequence van een melkeiwit gen in zes evenhoevigen, een walvis (de dolfijn *Lagenorhynchus obscurus*) en een onevenhoevige als outgroup. Een X op een plek geeft een onduidelijk geïdentificeerde nucleotide aan. Enkele posities die invariant of niet informatief zijn zijn met blauw gemarkeerd; posities die synapomorfies leveren zijn met oranje gemarkeerd. De fylogenie is gebaseerd op een parsimonie analyse van deze nucleotide synapomorfies. (Uit Evolutionary Analysis, Scott Freeman en John C. Herron)*



deze stappen complex klinken is hetzelfde gebeurd bij de twee bomen in figuur 34. Toen werd een enkel kenmerk - de vorm van de astragalus - in kaart gebracht op twee alternatieve stambomen. En vervolgens de boom aangewezen met de meeste parsimonie. Omdat maar gekeken werd naar één kenmerk en een klein aantal soorten kon dit met de hand gebeuren. Wanneer een computer op dezelfde manier een grote dataset evalueert, telt die het totaal aantal veranderingen in alle kenmerken voor elke mogelijke boom. De beste boom is dan die met de minste veranderingen voor alle kenmerken.

De eerste opmerking die gemaakt kan worden over de 60 kenmerken in de figuur is dat maar 15 kenmerken bruikbare fylogenetische informatie bevatten. Veel kenmerken zijn gelijk bij de onderzochte soorten. Bijvoorbeeld op positie 142 hebben alle betrokken soorten een G. De meest logische verklaring hiervoor is dat alle soorten in de studie een G op deze positie hebben geërfd van hun gemeenschappelijke voorouder. Andere posities zijn variabel maar niet informatief. Dit wordt geïllustreerd door positie 192 waar alle soorten een C hebben behalve de kameel. Om dit te kunnen gebruiken als een synapomorfie en dus bruikbaar in het afleiden van een fylogenie, moet een kenmerk bij twee of meer soorten aanwezig zijn. Het zou kunnen dat een C op deze plek dient als een synapomorfie dat helpt leden van de familie van kamelen te onderscheiden als een monofyletische groep. Nadere studie moet dan laten zien dat lama's en andere soorten in de familie van de kamelen hetzelfde kenmerk hebben.

Op basis van de gehele dataset concludeerden de onderzoekers dat walvissen en nijlpaarden het nauwst aan elkaar verwant zijn. Om te begrijpen waarom hun parsimonie analyse deze bewering ondersteunde kijken we naar positie 162. Merk op dat koe, hert, walvis en nijlpaard een T hebben op deze plek. Omdat de andere evenhoevigen en de outgroup een C hebben op positie 162, geeft de T waarschijnlijk een gedeeld, afgeleid kenmerk aan. Op dezelfde manier geeft positie 166 de enige synapomorfie in deze 60 basen voor een monofyletische groep bestaande uit walvissen en nijlpaarden.

Als kritische opmerking kan gemaakt worden dat niet alle informatieve DNA posities dezelfde manier van groeperen ondersteunen. Positie 177 levert een synapomorfie voor een clade bestaande uit walvissen, nijlpaarden, varkens en navelzwijnen. Dit geeft een conflict met de informatie op positie 162. Reversal of convergentie geeft duidelijk geresulteerd in homoplasie. Of positie 177 of 162 geven geen goede weergave van de evolutionaire geschiedenis van evenhoevigen.

Wat gebeurt er wanneer een computer elk van de informatieve kenmerken aanbrengt op de twee bomen in de figuur in paragraaf 10.2?

De evenhoevige hypothese in (a) impliceert een totaal aantal nucleotide veranderingen van 47 terwijl de walvis + nijlpaard hypothese in (b) 41 veranderingen heeft. Het verschil komt door de posities 151, 162, 166, 176, 177 en 194. Voor elk van deze kenmerken geeft de walvis + nijlpaard hypothese minder veranderingen aan dan de evenhoevige hypothese. Probeer om zelf eens te oefenen de reconstructie te maken met de meeste parsimonie voor elk van deze zes kenmerken op beide bomen, op dezelfde manier als voor de astragalus in de figuur in paragraaf 10.2. Dat is de beste manier om zelf te zien dat de evenhoevige hypothese een boom geeft die zes stappen langer is dan de boom die wijst op de walvis + nijlpaard hypothese.

Voor deze 60 kenmerken en acht soorten, heeft de walvis + nijlpaard hypothese de meeste parsimonie en is daarom de boom die de voorkeur heeft. Gebaseerd op deze conclusies noemden de onderzoekers hun verzameling van moleculaire gegevens de WHIPPO-1 dataset (Whale-hIPPO).

9.4 Zoeken tussen mogelijke bomen

In werkelijkheid moeten onderzoekers vele mogelijke bomen evalueren om te bepalen welke de meeste parsimonie heeft vanuit de gegevens - niet maar twee bomen zoals in het voorgaande gebeurd is. Zelfs in een studie van bescheiden grootte, wordt het aantal mogelijke bomen geweldig groot. Wanneer vier soorten worden bekijken, zijn drie verschillende vertakkingspatronen mogelijk. Wordt er een vijfde soort aan de dataset toegevoegd, dan ga je van 3 naar 15 mogelijkheden. Een zesde soort toegevoegd geeft 105 mogelijkheden en een zevende 945 mogelijkheden. Voor de 8 soorten in de figuur in paragraaf 10.2 zijn er 10395 mogelijke bomen. Als dit veel klinkt, bedenk dan dat het nu routine is om studies uit te voeren met 50 of meer soorten. Met dergelijke grote analyses, is een niet te bevatten groot aantal bomen mogelijk. Gelukkig zijn er verschillende benaderingen mogelijk om een computer te laten zoeken naar de boom met de meeste parsimonie.

Ook met een uitgebreidere dataset en daarom andere zoekmethodes werden resultaten gevonden consistent met de fylogenie van figuur (b).

Deze overeenkomst tussen resultaten van de zoekmethodes laat zien dat de nauwe verwantschap tussen walvissen en nijlpaarden niet een fout van een onvolledig zoeken of van een onvolmaaktheid van de zoekmethodes is. Resultaten zoals deze helpen de onderzoekers gerust te stellen dat ze de nauwkeurigste boom hebben gevonden, gegeven de data.

9.5 Het evalueren van de beste boom

Na het vergelijken van verschillende of alle mogelijke bomen, wordt de vraag: Hoe goed is de ‘beste’ boom? Is de boom met de meeste parsimonie significant beter dan bomen die een klein beetje minder parsimonie hebben? Om hier antwoord op te krijgen, evalueren onderzoekers een serie bomen met hoge parsimonie. Ze maken hieruit een boom met het best mogelijke vertakkingspatroon.

9.5.1 Andere methodes naast parsimonie: Maximum likelihood en Bayesian inference

Als aanvulling op het vinden van de beste boom verkregen door een parsimonie analyse, analyseren de meeste onderzoekers hun dataset met een fylogeniemethode die een waarschijnlijkheid of likelihood berekent dat alternatieve bomen worden ondersteund door hun gegevens. Deze benaderingen worden maximum likelihood (ML) en Bayesian Markov Chain Monte Carlo (BMC) methodes genoemd.

...

Een derde algemene benadering om fylogenie af te leiden zijn de distancemethodes.

Evolutie biologen blijven onderzoeken wanneer parsimonie, ML/BMC of distance methodes het beste functioneren en er worden steeds nieuwe methodes ontwikkeld. De huidige consensus is dat ML/BMC benaderingen zowel betrouwbaar als krachtig zijn in het analyseren van DNA sequence data of andere kenmerken waar het patroon van verandering in kenmerken in de tijd behoorlijk is begrepen. De meeste onderzoekers zijn het er echter over eens dat het verstandig is om een combinatie van benaderingen te gebruiken, met parsimonie, ML en BMC als de tegenwoordig meest gekozen methodes. Deze strategie levert verschillende manieren om te evalueren hoe goed een bepaalde boom is: (1) produceer een consensus boom onder parsimonie (2) gebruik statische testen om de beste bomen onder ML en BMC te evalueren (3) vergelijk de beste bomen onder parsimonie, ML en BMC om te zien hoe consistent ze zijn. Als de resultaten consistent zijn, zijn de onderzoekers overtuigd dat ze de beste boom hebben gevonden, ondersteund door de data.

9.5.2 Evalueren van bepaalde takken: bootstrapping

Veronderstel dat een onderzoeksteam een dataset analyseert door gebruik te maken van parsimonie, ML en BMC benaderingen, en dat de resultaten hen overtuigen dat ze de beste boom hebben gevonden, gegeven de data. Hoe overtuigd kunnen ze dan zijn dat bepaalde knopen en takken binnen de boom worden ondersteund door de gegevens?

Bijvoorbeeld, hoe overtuigd zijn we dat de data de knoop die walvissen en nijlpaarden verbindt sterk ondersteunen?

De vraag is analoog aan de vraag hoe betrouwbaar het meten van de lengte in een groep mensen is. Als je een aantal mensen meet en het gemiddelde hiervan berekent, dien je je

af te vragen of het gemiddelde van je steekproef een nauwkeurige weergave is van het ware gemiddelde van de gehele populatie. Om deze vraag te beantwoorden, gebruik je je metingen om een statistische waarde te berekenen die de hoeveelheid variatie rond het gemiddelde aangeeft. Als de variatie hoog is, ben je minder overtuigd dat je steekproef gemiddelde betrouwbaar is.

Om vragen te beantwoorden over de betrouwbaarheid van bepaalde takken in een fylogenie boom, dienen onderzoekers die takken statistisch te evalueren. Met bomen gebaseerd op ML of BMCMC analyses, kun je bomen vergelijken met en zonder een bepaalde tak en berekenen welke het meest waarschijnlijk is. Met bomen gebaseerd op een parsimonie analyse, wordt de meest populaire manier om takken te evalueren bootstrapping genoemd.

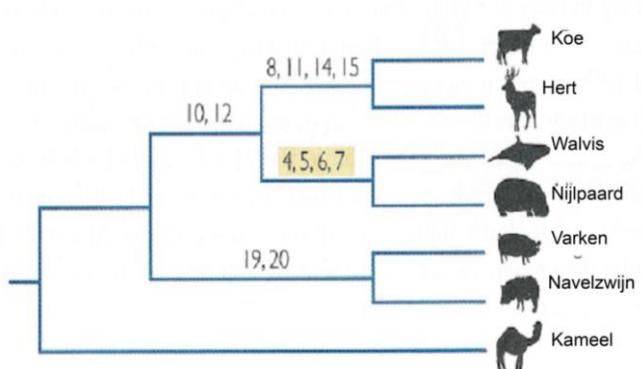
....

Wanneer alle soorten en alle moleculaire kenmerken in de WHIPPO-1 dataset werden geanalyseerd, nadert bootstrap support voor deze knoop de 100%. In sommige analyses van bekende fylogenieën - waar onderzoekers laboratoriumorganismen laten voortbrengen en hun populaties splitsen om lijnen van bekende verwantschap te creëren - werd bij een *bootstrap support* van rond de 70% of hoger de werkelijke fylogenie gevonden. Op basis van bootstrapping lijkt de nauwe verwantschap tussen walvissen en nijlpaarden stekhoudend.

9.6 Conflict oplossen

Wat gebeurt er wanneer bomen door verschillende fylogenie methodes of door analyses van verschillende kenmerken met elkaar in conflict zijn? Stel bijvoorbeeld dat de resultaten van de

Locus	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Koe	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
Hert	0	0	0	0	0	0	0	1	?	1	1	1	1	1	1	?	1	1	0	0
Walvis	1	1	1	1	1	1	1	0	?	1	0	1	1	0	0	0	?	1	0	0
Nijlpaard	0	?	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	0	?	1	0	0
Varken	0	0	0	?	0	0	0	0	?	0	0	0	?	?	0	0	0	1	1	1
Navelzwijn	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	1	1
Kameel	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0



Figuur 36: Bijna perfecte fylogenetische kenmerken? De tabel laat de aanwezigheid (1) of afwezigheid (0) van een SINE of LINE op 20 verschillende locaties zien in de genomen van 6 evenhoevigen en een walvis (*Baird's beaked whale*, *Berardius bairdii*, de zwarte dolfijn). Vraagtekens (?) geven plaatsen aan die onzeker zijn in sommige soorten. De fylogenetische boom werd geproduceerd door een parsimonie analyse van deze 20 kenmerken. De aanwezigheid van een SINE of LINE op plaatsen 4-7 definiëren een clade van walvissen en nijlpaarden. Uit Evolutionary Analysis, Scott Freeman en John C. Herron)

morfologische analyse in paragraaf 9.2 en de moleculaire studie in paragraaf 9.3 niet met elkaar overeen komen. Bomen die gebaseerd zijn op verschillende kenmerken of op verschillende fylogenie methodes worden behandeld als concurrerende schattingen van de werkelijke evolutionaire geschiedenis van de groep.

In conflictsituaties hebben onderzoekers meer vertrouwen in bomen die zijn geschat met grotere datasets, van kenmerken die minder vatbaar zijn voor homoplasie, en met methodes die het meest geschikt zijn voor de te onderzoeken data. Maar in veel situaties is de meest voorzichtige houding te wachten op aanvullende data die onafhankelijk zijn van de huidige geanalyseerde kenmerken.

In het geval van de walvis evolutie is een mogelijkheid dat nieuw ontdekte fossiele evenhoevigen en walvissen kenmerken kunnen hebben die duidelijk een van de twee hypotheses ondersteunen. Ook kunnen nieuwe moleculaire data het conflict oplossen. In de situatie van de walvissen gebeurde beide.

Nieuwe moleculaire data die de fylogenie van walvissen verduidelijkten kwamen te voorschijn uit recente fossiele vondsten. De betreffende moleculaire data zijn de aan- of afwezigheid van DNA sequences die zichzelf soms op een nieuwe locatie in een genoom plaatsen. De betrokken genen worden SINEs en LINEs genoemd, voor Short or Long INterspersed Elements. De aanwezigheid of absentie van een bepaalde SINE of LINE op een homologe plek in het genoom van twee verschillende soorten kan gebruikt worden als een kenmerk in de afleiding van fylogenie.

Eind jaren '90 werden de mogelijke voordelen van het gebruiken van SINEs en LINEs in de afleiding van fylogenie geschatst. Men is het er over eens dat retrotranspositie waarbij de sequentie van buiten zichzelf in een nieuwe locatie op het genoom plaatst betrekkelijk zeldzaam is. Met als gevolg dat het buitengewoon onwaarschijnlijk is dat twee homologe SINEs zichzelf zouden plaatsen in twee onafhankelijk gastlijnen op precies dezelfde positie. Deze soort van convergentie is mogelijk, maar begrijpelijkwijjs zeer onwaarschijnlijk. Reversal naar een eerdere toestand is ook onwaarschijnlijk, omdat het verlies van een SINE of LINE gewoonlijk kan worden waargenomen. Wanneer SINEs en LINEs zijn verloren, is het gebruikelijk om ook het bijbehorende verlies van een deel van het gastgenoom waar te nemen, want een deel van het genoom gaat verloren. Met als resultaat dat onderzoekers over het algemeen kunnen zeggen of een bepaald parasitair gen ontbreekt of verloren is geraakt. Als convergentie en reversal zeldzaam zijn of kunnen worden herkend, dan is homoplasie onwaarschijnlijk. SINEs en LINEs moeten dus buitengewoon betrouwbare kenmerken zijn om te gebruiken in een fylogenie afleiding.

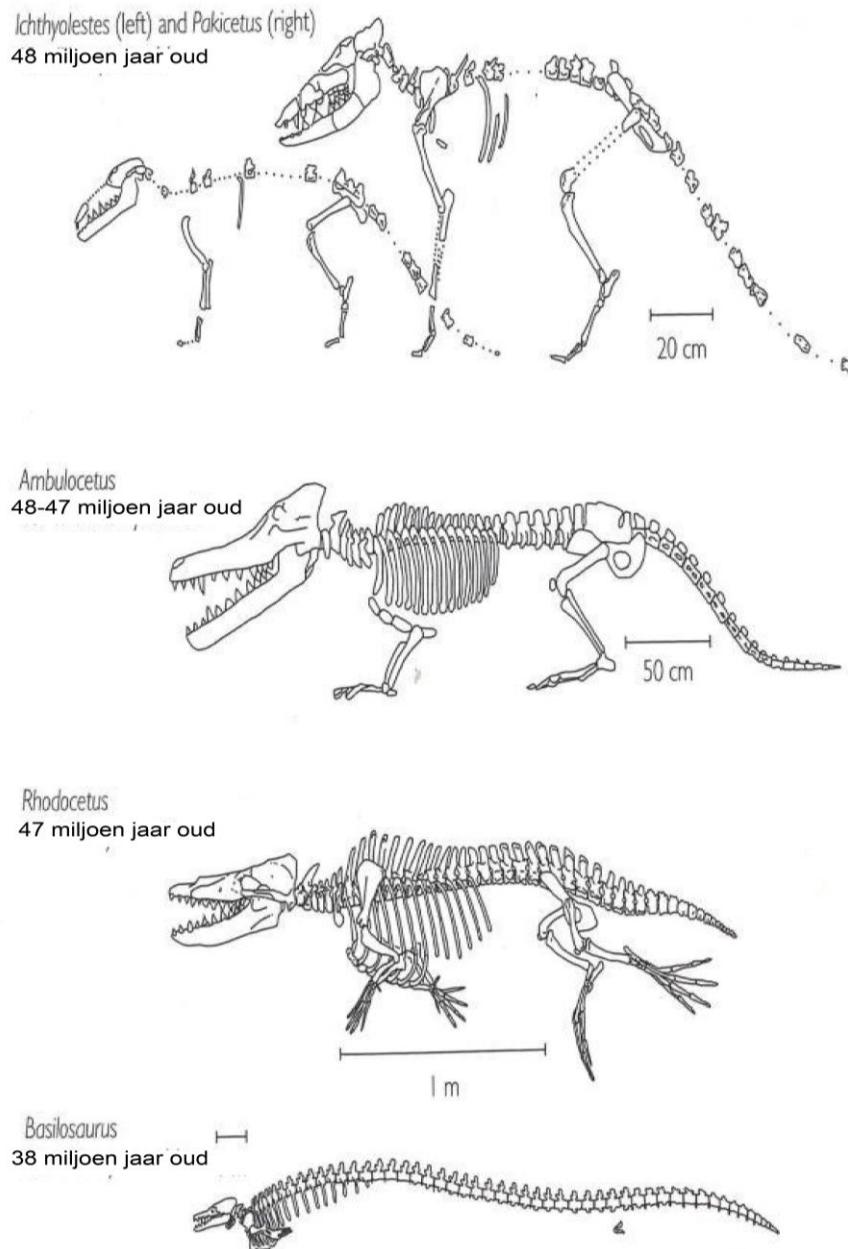
Wat hebben SINEs en LINEs te zeggen over de evolutie van de walvis? Eind jaren 90 beantwoordden onderzoekers deze vraag door 20 verschillende SINEs en LINEs te analyseren die ze vonden in de genomen van evenhoevigen. De data voor de soorten die ze hebben bekeken zijn gegeven in onderstaande figuur, samen met een boom dat laat zien hoe deze data passen in de walvis + nijlpaard boom.

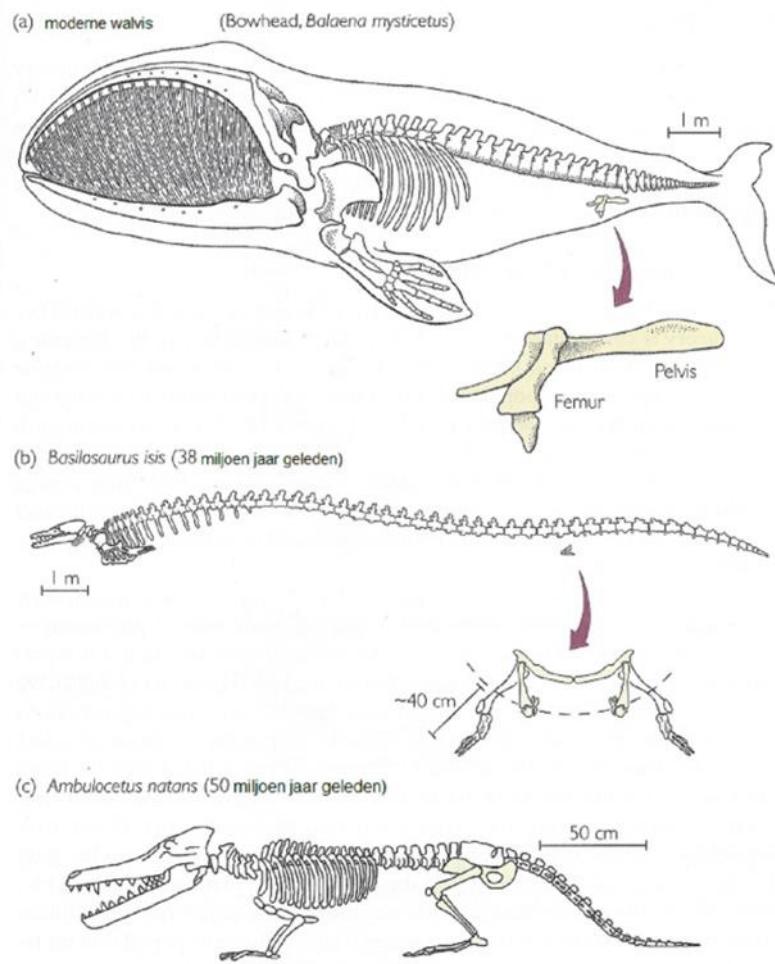
Kijk eens naar elk van de 20 genen en merk op dat de aanwezigheid of afwezigheid van iedere SINE of LINE optreedt als een synapomorfie dat precies een clade in de fylogenie aangeeft. Anders gezegd, er is geen enkele homoplasie in de dataset en dus geen

conflicten tussen de kenmerken wanneer ze in de boom aangegeven zijn. De analyse is opmerkelijk zuiver en bevestigt sterk de conclusie van de DNA sequence studies.

Niet lang na de publicatie van dit onderzoek, kondigden tegelijk twee onderzoeksteams fossiele vondsten aan die werden gekenmerkt als ‘one of the most important events in the past century of vertebrate paleontology’. De oudste fossielen kwamen uit 48 miljoen jaar oude rotsen en bestonden uit twee soorten: de *Pakicetus attocki*, zo groot als een wolf en de *Ichthyolestes pinfoldi*, zo groot als een vos. Beide waren creaturen, met lange poten en lange staarten, die duidelijk landdieren waren. Beide soorten hebben synapomorfies in de grootte en vorm van hun oorbotten dat hen duidelijk identificeert als walvissen, evenals een astragalus (met aan de boven- en onderkant een soort inkeping als bij een katrol) dat hen kenmerkt als evenhoevigen. Dezelfde twee kenmerken zijn duidelijk aanwezig in twee iets recentere soorten, *Rodhocetus kasrani* en *Artiocetus clavis*, gedateerd op 47 miljoen jaar geleden. Samen genomen beschrijven deze nieuwe fossielen de overgang van land-naar waterleven op een bevredigende manier. Zie ook onderstaande figuren.

Figuur 37: Vroege walvissen verhuisden van een aard- naar wateromgeving. De getekende fossielen illustreren enkele veranderingen die plaats vonden vroeg in de walvis evolutie, toen leden van deze lijn de overgang van land naar water maakten. Een vergelijking met enkele van deze fossielen met een moderne walvis wordt getoond in de volgende figuur. Uit Evolutionary Analysis, Scott Freeman en John C. Herron)





Figuur 38: Overgangsfossielen die de evolutie van walvissen uit voorouders met poten onderbouwen. (a) Sommige hedendaagse walvissen hebben een rudimentair dijbeen en bekken. (b) *Basilosaurus isis* fossielen zijn ongeveer 38 miljoen jaar oud. Ze hebben gereduceerde achterledematen die waarschijnlijk niet functioneerden bij het zwemmen. In plaats daarvan kunnen de poten gebruikt zijn als grijporgaan tijdens paring. (c) *Ambulocetus natans* (letterlijk vertaald “walk-whale swimming”) fossielen zijn ongeveer 50 miljoen jaar oud. Ze hebben functionele achterledematen die waarschijnlijk gebruikt werden als peddels bij het zwemmen, zoals bij moderne otters. Uit Evolutionary Analysis, Scott Freeman en John C. Herron)

Het fossielenarchief bevestigt dat deze overgang plaats vond in een lijn van evenhoevigen die de hedendaagse walvissen, dolfijnen en bruinvissen werden. Recente analyses van dit fossielenarchief hebben ook een uitgestorven groep van semi-water evenhoevigen aangegeven als de zustergroep van walvissen (2005). Dit archief legt een verbinding tussen de voorouders van de hedendaagse nijlpaarden en de voorouders van de hedendaagse walvissen, en suggereert dat beide zijn geëvolueerd uit dezelfde semi-water voorouder.

9.7 Take-home messages

Als het verhaal van de walvisevolutie iets leert, is het dat het afleiden van fylogenieën een serie uitdagingen oplevert: het kiezen van te onderzoeken homologe kenmerken die synapomorfies leveren en homoplasie minimaliseren, het zoeken uit de vele bomen die

mogelijk zijn om de boom te vinden die of de meeste parsimonie heeft of de meest waarschijnlijke is onder een bepaald model van evolutie van kenmerken, en het gebruiken van bootstrapping of andere technieken om te evalueren hoe goed de data bepaalde takken in de boom ondersteunen. Verder komt het vaak voor dat verschillende onderzoeksteams met strijdige resultaten komen door verschillende kenmerken te analyseren. En conflicten worden opgelost door aanvullende analyses - vaak door gebruik te maken van nieuwe kenmerken of nieuwe fylogeniemethodes.

De laatste 25 jaar hebben een explosie laten zien in de grootte en kwaliteit van de datasets die gebruikt worden in het bepalen van fylogenetische bomen en een verfijning van fylogenetische technieken.

Evolutiebiologen beginnen de aanwezigheid en afwezigheid van bepaalde genen te gebruiken als kenmerken in een fylogenie afleiding. Er is steeds meer interesse in het combineren van morfologische en moleculaire kenmerken binnen een onderzoek en in DNA analyses met vele genen in plaats van maar één of een paar. Jaar na jaar, studie na studie, krijgen biologen een duidelijker en helderder beeld van de grootte en vorm van de Tree of life.

Vraag 45: Over het artikel uit *Evolutionary Analysis*

- a. Wat is de outgroep bij de bepaling van de fylogenetische boom van de walvis?
- b. Welke technieken om de meest optimale boom te krijgen worden, naast de parsimonie-analyse, beschreven in de paragraaf? Vertel in een paar zinnen wat de methodes inhouden.
- c. Wat wordt bedoeld met SINEs en LINEs?

Opdracht 46: Bedenkingen.

Vanuit creationistische hoek wordt kritisch gekeken naar het opstellen van een evolutionaire boom met behulp van morfologische kenmerken en moleculaire kenmerken.

Lees in de map achtergrondinformatie paragraaf 10.2 Moleculaire biologie uit het boek *Evolutie, Het nieuwe studieboek* van Reinhard Junker en Siegfried Scherer. In het boek wordt een fylogenetische boom een dendrogram genoemd.

Hoe kijk je tegen hun verhaal aan? Worden in de paragraaf bezwaren of enkel problemen/moeilijkheden met moleculaire biologie genoemd? Licht je antwoord toe.

Donderdagmiddag bij evolutiebiologie.

De beide Tommen zijn onder de indruk van de hoeveelheid informatie over DNA en eiwitten. Beschikbaar voor iedereen via internet.

'En dan te bedenken dat de informatietoename alleen maar steeds sneller gaat.

Het sequencen gaat steeds sneller' reageert prof Stam.

Tom geeft aan: 'Wat zijn we zo al veel te weten gekomen! En dat door een stom ongeluk. Doordat ik tegen een stuk steen ben gelopen dat een fossiel blijkt te bevatten.'

Oom Tom: 'Ja, een fossiel van 240 miljoen jaar oud volgens prof Ossiel. En de steen zelf is dan, zo gaf hij aan, ook 240 miljoen jaar oud. Maar die steen is 240 miljoen jaar geleden natuurlijk niet uit het niets verschenen. De atomen, het materiaal waaruit de steen bestaat bestond natuurlijk al veel eerder. Al toen de aarde ontstond.'

'Maar hoe oud is de aarde dan?' vraagt Tom

'Wel, dan spreken we over een ouderdom van 4,5 miljard jaar, maar het materiaal van de aarde was er al veel eerder.' antwoordt prof Stam.

Tom zucht eens: 'Hoe oud is dat materiaal dan?'

'Dat is helaas een ander onderzoeksterrein, waarin ik niet deskundig ben. Je moet je dan bij de afdeling kosmologie vervoegen. Toevallig werkt daar een collega, die ik goed ken uit mijn corpstijd. Professor Aad Stroo. Ik bel hem wel even of je morgen bij hem terecht kunt.'

Zo gezegd, zo gedaan. Alles loopt voorspoedig. Morgen kunnen ze bij Aad Stroo komen in de sterrenwacht. Hij waarschuwt Tom nog wel, dat het misschien wat ingewikkeld wordt. Weet hij wat elektromagnetische straling is? En het dopplereffect? En kent hij de goniometrische verhoudingen?

'Oeps', denkt Tom, 'Dat kijk ik morgenochtend toch maar even na in mijn wiskunde- en natuurkundeboek.'

Deel 4: Bij de astronomen

Opzet van dit deel

Als je iets wilt zeggen over de leeftijd van het heelal moet je eerst weten of het heelal begrensd is en hoe groot het dan is.

In de oudheid is de omtrek van de aarde al gemeten. Wetenschappers bepaalden daarna de diameter van de maan, de afstand van de aarde tot de maan en tot de zon.

Vanaf 1838 worden afstanden tot sterren gemeten met de parallax, de schijnbare beweging ten opzichte van de achtergrond. Deze methode is niet bruikbaar voor sterren die ver weg staan.

Vanaf ongeveer 1900 worden veranderlijke Cepheïden gebruikt als ‘standaardkaarsen’ om de afstand tot die sterrenstelsels te meten.

Omstreeks die tijd ontstaan vanuit de relativiteitstheorie nieuwe modellen over het heelal. Het heelal zou een begin hebben.

Met het dopplereffect kan de snelheid van sterrenstelsels worden bepaald.

Hubble combineerde gegevens over afstand en snelheid van sterrenstelsels met elkaar en kon zo de ouderdom van het heelal schatten.

We kijken in dit deel naar verschijnselen, die het oerknalmodel ondersteunen. Daarna maken we een reis door de tijd en zien hoe materie zou kunnen zijn ontstaan.

Tenslotte staan we stil bij problemen voor het oerknalmodel.

Leerdoelen:

Je kunt met eenvoudige goniometrie afstanden in het heelal berekenen.

Je kunt van een gegeven ster de parallax berekenen.

Je kunt uitleggen wat veranderlijke Cepheïden zijn en hoe hiermee afstanden kunnen worden bepaald.

Je kunt aangeven wat de invloed is van de relativiteitstheorie van Einstein op de ontwikkeling van modellen over het heelal en waarom hij de kosmologische constante invoerde.

Je kunt aangeven wat de verdienste van Lemaître is.

Je kunt met voorbeelden het dopplereffect uitleggen en aangeven hoe het dopplereffect bij licht werkt.

Je kent de wet van Hubble en kunt hem gebruiken om de leeftijd van het heelal te schatten.

Je kunt globaal aangeven hoe het oerknalmodel het ontstaan van materie en van sterren en planeten verklaart.

Je kunt verschijnselen noemen die het oerknalmodel ondersteunen en aangeven wat de problemen voor dit model zijn.

Vrijdagmorgen

Tom bladert in zijn boeken en vindt informatie over Golven en straling, over goniometrische verhoudingen en gelijkvormige driehoeken. Zie de achtergrond informatie.

Vrijdagmiddag bij astrofysica

Ze treffen Professor Aad Stroo in de koepel bij de telescoop. Het is een man met lang wit haar en kleine ogen. Hij verontschuldigt zich, dat hij de hele nacht waarnemingen heeft gedaan aan de sterrenhemel.

‘Wel, Tom, waarmee kan ik je helpen?’

‘Professor, we hebben in Winterswijk een steen gevonden met een fossiel erin. Volgens de boer, van wie het land is, ligt hij er al 13 jaar. Volgens de paleontologie is het fossiel tussen de 5 en 300 miljoen jaar oud.

De geologen denken, dat de aardlaag, waarin het fossiel lag zo’n 240 miljoen jaar oud is. Maar hoe oud zijn de atomen van die steen zelf nu?’

De professor krabt zich eens achter het oor en zegt: ‘De aarde is 4,5 miljard jaar geleden ontstaan, tegelijk met de zon en de andere planeten. De atomen van die steen zijn echter al veel eerder ontstaan. Het proces, waarbij dat is gebeurd noemen we nucleosynthese. Wij denken, dat dat proces ongeveer 9 miljard jaar geleden is begonnen, dus zo’n 4,7 miljard jaar na de oerknal.’

‘Hoe weet u dat allemaal?’

‘Ja, Tom, dat is een lang verhaal.... De hele theorie staat of valt met het meten van afstanden in het heelal. Dat begint allemaal met Erathostenes, ruim 200 jaar voor Christus.’

10 AFSTANDEN METEN IN HET HEELAL

10.1 De Grieken en afstanden in het heelal

In de tijd voor Erathostenes wist men wel, dat de aarde rond was. Men zag schepen na verloop van tijd achter de horizon verdwijnen totdat alleen het topje van de mast nog zichtbaar was. Niemand wist echter of de omtrek van de aarde nu vierduizend kilometer was of misschien wel 40 miljoen kilometer.

Erathostenes beantwoordde die vraag op een wetenschappelijke manier. Hij hoorde over een waterput in Syene in Egypte met een merkwaardige eigenschap. Op 21 juni scheen de zon daar ieder jaar om 12 uur ’s middags recht in de put en verlichtte die helemaal tot op de bodem. Hij besefte, dat dat in zijn woonplaats Alexandrië, dat verder naar het Noorden ligt, nooit gebeurde. Hij zag in dat de zon zich door de kromming van de aarde niet tegelijkertijd recht boven Syene en Alexandrië kon bevinden.

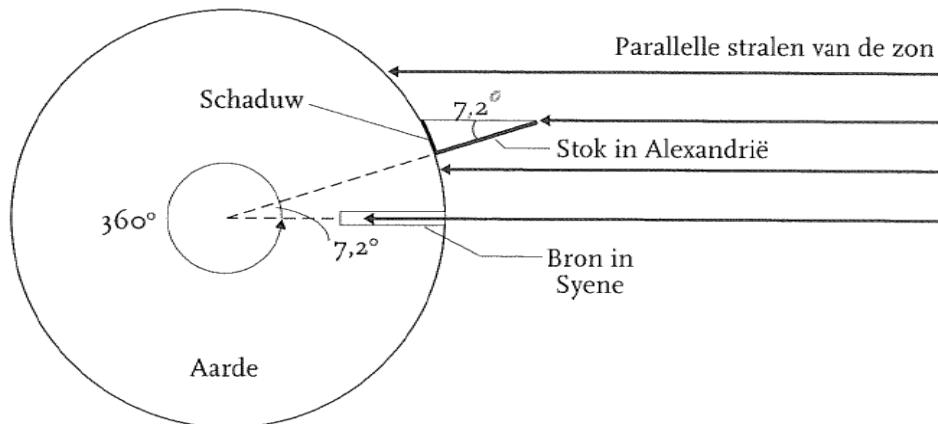
Precies op 21 juni om 12 uur ’s middags stak hij in Alexandrië een stok verticaal in de grond en mat de hoek tussen de zonnestralen en de stok. Hij kwam uit op $7,2^\circ$. Zie de figuur hieronder.

Erathostenes mat de afstand van Alexandrië tot Syene. Die bleek 5.000 stadiën te zijn.

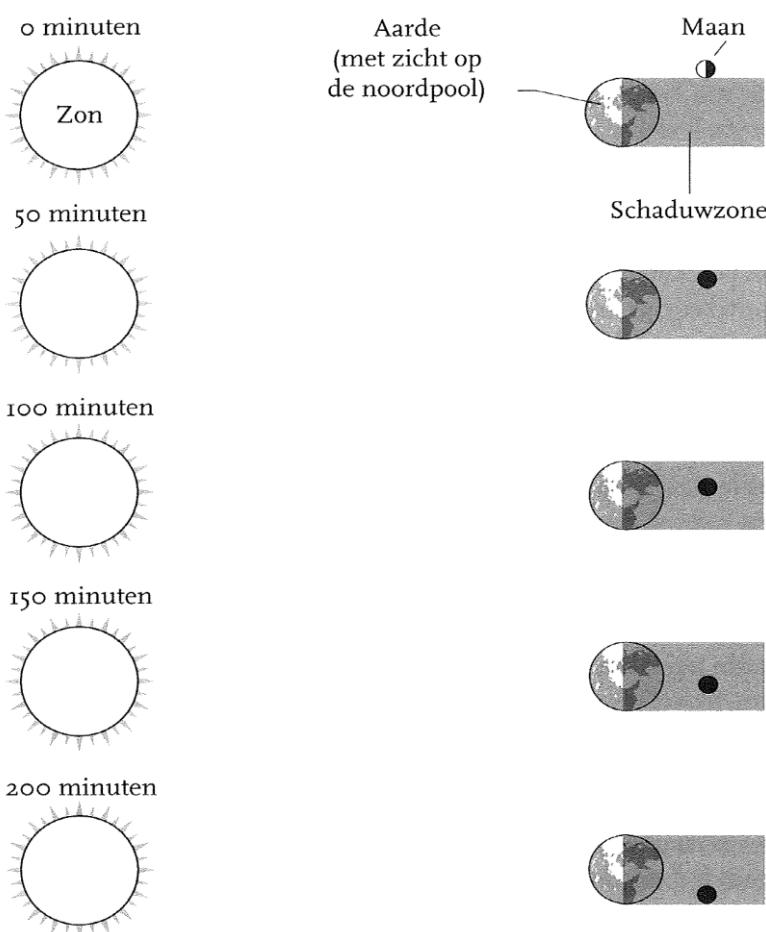
Opgave 47

- a. Hoe lang is de schaduw van de stok van Erathostenes geweest als hij 2,0 m lang was?
- b. Bereken met behulp van bovenstaande gegevens de omtrek van de aarde in stadiën. De Griekse stadie was 185 m en de Egyptische stadie 157 m.

- c. Bereken met beide maten de omtrek van de aarde die Erathostenes zo vond.
d. Bereken voor beide antwoorden de procentuele afwijking van de werkelijke omtrek van de aarde, die je met behulp van Binas kunt berekenen.



Figuur 39: Bepaling omtrek van de aarde



Figuur 40: Bepaling diameter van de maan

schaduw van de aarde raakt en het moment dat de maan volledig bedekt is. De tijd van 50

Het geniale van Erathostenes was, dat hij liet zien dat je voor het meten van de omvang van een planeet alleen een man met een stok en een goed stel hersens nodig had.

Vervolgens bepaalde hij de diameter van de maan. Zie de figuur hieronder.

Tijdens een maansverduistering nam hij het passeren van de maan door de schaduw van de aarde waar. Omdat de aarde en de maan zeer ver van de zon af staan, is de afmeting van de schaduw van de aarde ongeveer gelijk aan de afmeting van de aarde zelf.

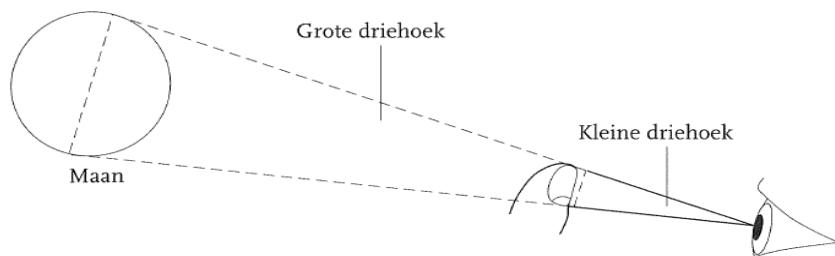
In de tekening hiernaast is te zien dat er ongeveer 50 minuten verlopen tussen het moment dat de maan de

minuten is dus een indicatie voor de diameter van de maan. De voorkant van de maan doet er 200 minuten over om de schaduw van de aarde volledig te passeren, wat een indicatie is voor de diameter van de aarde.

Opgave 48

- Hoe groot is volgens deze metingen de verhouding van de diameter van de maan en van de aarde?
- Ga met behulp van Binas na in hoeverre dat klopt.

Daarna was het voor Erathostenes niet moeilijk meer om de afstand tot de maan te berekenen. Een manier is je blik op de volle maan te richten, één oog dicht te doen en je arm uit te strekken. Je kunt dan net de maan afdekken met het uiteinde van je wijsvinger. Zie figuur 41.



Figuur 41

Opdracht 49

- Bereken de afstand van de aarde tot de maan met behulp van metingen, die je bij jezelf doet.
- Vergelijk de waarde die je vindt met de waarde in Binas.

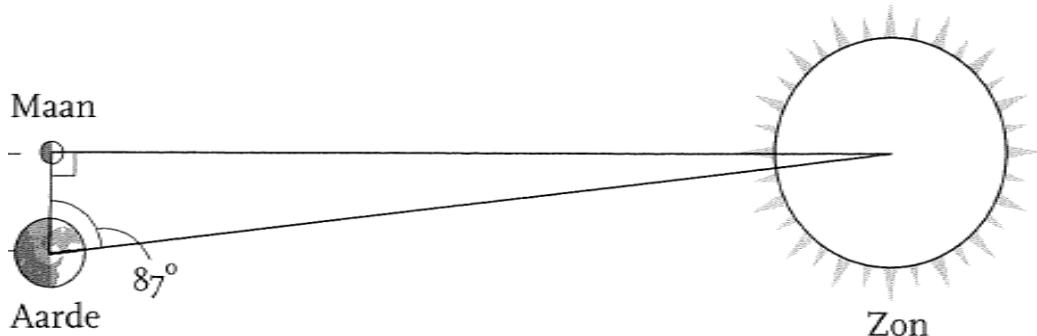
Aristarchos mat vervolgens de afstand van de aarde tot de zon.

Als de maan precies half zichtbaar is vormen de aarde, de maan en de zon de hoekpunten van een rechthoekige driehoek. De hoek tussen de richting waarin je dan de zon ziet en de richting van de maan mat hij op. Hij vond 87° . Zie de figuur hieronder.

Opgave 50

De maan staat 384 duizend km van de aarde.

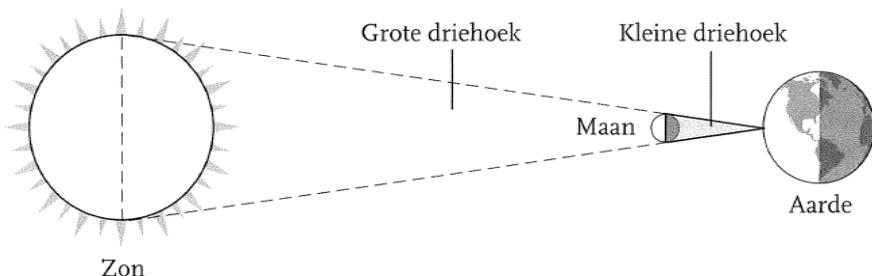
- Bereken hiermee en met de meting van Aristarchos de afstand van de aarde tot de zon. De hoek kon Aristarchos niet erg nauwkeurig meten.
- Gebruik Binas om de hoek nauwkeuriger te berekenen.



Figuur 42

Het berekenen van de grootte van de zon is dan geen probleem meer. Het was de Grieken al bekend, dat de maan de zon nagenoeg volledig bedekt bij een totale zonsverduistering. Zie de figuur hieronder.

De diameter van de maan en de afstand van de maan tot de aarde waren gemeten. Ook de afstand van de zon tot de aarde was bekend.



Figuur 43

Opgave 51

- Bereken nu met de figuur hierboven de diameter van de zon.
- Vergelijk die met de waarde van Binas.

10.2 Afstand meten met parallax

Als je uit een trein kijkt zie je voorwerpen dichtbij snel bewegen en de horizon bijna stilstaan. Kijk je afwisselend met je linker- en je rechteroog naar je opgestoken vinger, dan zie je die ten opzichte van de achtergrond verspringen. Deze beweging ten opzichte van de achtergrond noemen we parallax.

Sterren, die relatief dicht bij de aarde staan, vertonen een schijnbare beweging ten opzichte van de sterren ver weg. De zon is de ster, die het dichtst bij de aarde staat.

Daarom is zijn schijnbare beweging groot. Nu kun je proberen de afstand tot een ster te schatten door op twee plaatsen van de aarde tegelijk naar de ster te kijken.

Voor praktisch alle sterren is de diameter van de aarde echter te klein om een verschil in richting waar te nemen. Sterrenkundigen gebruiken daarom de baan van de aarde om de zon om twee metingen te doen, die een half jaar uit elkaar liggen. Zie figuur 44.

Opgave 52

Bepaal in figuur 44 de afstand van de aarde tot de ster. Je mag aannemen dat de figuur op schaal is.

De figuur hiervoor is niet realistisch want zelfs de dichtstbijzijnde ster na de zon staat veel verder weg. Pas in 1838 lukte het om met de parallaxmethode de afstand van de ster 61 Cygni te meten. Die bleek $93 \cdot 10^{15}$ m te zijn. Begin twintigste eeuw waren ongeveer 100 sterparallaxen bekend. Inmiddels zijn dat er meer dan honderdduizend. De methode kan gebruikt worden tot een afstand van ongeveer 10^{19} m.

Opgave 53

Hoe groot is het hoekverschil tussen de twee metingen als de afstand tot een ster 1 kpc is? 1 pc = 1 parsec = $3,09 \cdot 10^{16}$ m.

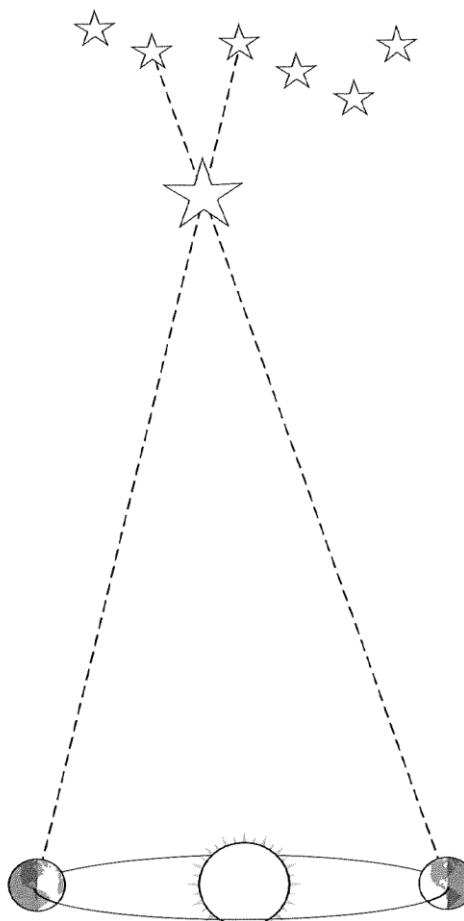
Voor grotere afstanden in het heelal zijn andere methoden nodig. Die zijn ook ontdekt. Een methode die voor grote afstanden werkt is die met de veranderlijke Cepheïden.

10.3 Veranderlijke cepheïden

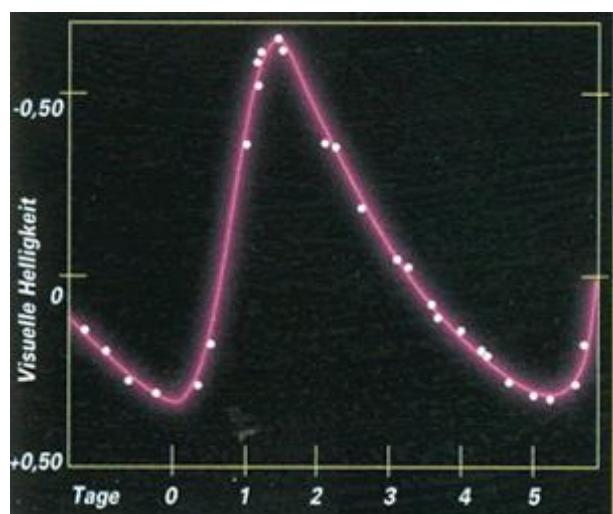
Cepheïden zijn sterren, waarvan de helderheid periodiek varieert. Ze zijn genoemd naar Delta Cephei, bij welke ster dit voor het eerst is waargenomen. Zie figuur 45.

Henrietta Leavitt ontdekte in de jaren na 1894 op fotografische platen van de sterrenhemel meer dan 2400 variabele sterren. De enige informatie, die men had van cepheïden was de schijnbare helderheid en de periode van de variatie. Bij de ster in de figuur is die periode bijvoorbeeld 5 dagen.

Zij was gefascineerd door deze sterren en wilde kijken of er een verband is tussen de periode van de variatie en de helderheid. Sterrenkundigen hadden zich al lang daarvoor gerealiseerd, dat ze alleen de schijnbare helderheid van een ster konden waarnemen en niet de werkelijke helderheid. Een schijnbaar heldere cepheïde kan bijvoorbeeld een zwak schijnende ster zijn die



Figuur 44



Figuur 45

dichtbij staat, terwijl een schijnbaar zwakke cepheïde in werkelijkheid een heldere ster kan zijn die ver weg staat.

De situatie leek hopeloos en de meeste sterrenkundigen zouden het allang hebben opgegeven, maar Leavitt kwam dankzij haar geduld, toewijding en opmerkzaamheid op een briljant idee.

Ze richtte de aandacht op de Kleine Magelhæese Wolk, een sterrenformatie die alleen op het zuidelijk halfrond zichtbaar is. Zij spoorde in deze sterrenwolk 25 cepheïden op. Ze wist niet hoe groot de afstand van de aarde tot de Kleine Magelhæese Wolk was, maar vermoedde dat het sterrenstelsel relatief ver weg stond en dat de cepheïden erbinnen relatief dicht bij elkaar stonden. Met andere woorden, de 25 cepheïden stonden allemaal min of meer even ver van de aarde.

Plotseling had Leavitt beet. Dat was precies wat ze nodig had. Als de cepheïden in de Kleine Magelhæese Wolk stuk voor stuk op ongeveer even grote afstand van de aarde stonden, dan was een cepheïde die helderder was dan een andere niet slechts schijnbaar, maar echt helderder.

De aanname dat de sterren in de Kleine Magelhæese Wolk ruwweg even ver van de aarde stonden was een opmerkelijke gedachtesprong, maar geen onredelijke. Leavitt redeneerde zoals een waarnemer die in de lucht een zwerm van 25 vogels ziet en aanneemt dat de afstand tussen de afzonderlijke vogels relatief klein is vergeleken met de afstand tussen de waarnemer en de zwerm. Als een van de vogels in die situatie kleiner lijkt dan de andere, dan is hij waarschijnlijk ook kleiner. Maar als je die 25 vogels verspreid in de lucht zou zien en een ervan zou kleiner lijken dan de andere, dan zou je niet met zekerheid kunnen zeggen of die vogel werkelijk kleiner is of alleen maar verder weg.

Leavitt maakte een diagram, waarin ze de logaritme van de periode van de cepheïden uitzette tegen de schijnbare helderheid (de magnitude m).

In de figuur hieronder is dat gebeurd voor veel meer cepheïden.

Leavitt had dus een eenvoudige

wiskundige relatie ontdekt tussen de

werkelijke helderheid van een

cepheïde en de periode van

schommelingen in de helderheid.

Hoe groter de helderheid, hoe

langer de periode tussen de pieken

in de helderheid.

Leavitt was er van overtuigd dat

deze regel toepasbaar was op alle

variabele sterren van het

cepheïdetype in het heelal, en dat

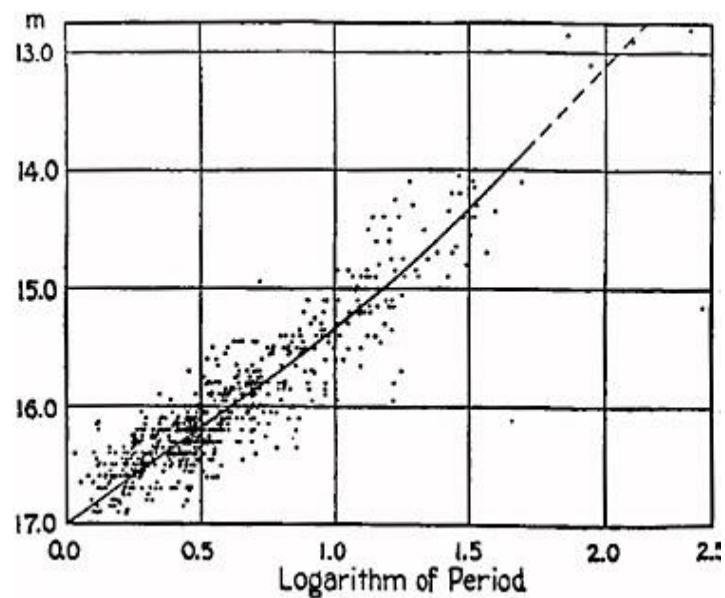
ook cepheïden met een zeer lange

periode door extrapolatie onder te

brengen waren in haar diagram.

Cepheïden worden daarom ook wel

'standaardkaarsen' genoemd.



Figuur 46

Het was een verbijsterende uitkomst met tal van gevolgen voor de bestudering van de kosmos.

Dankzij haar ontdekking was Leavitt nu in staat twee willekeurige cepheïden aan de hemel onderling te vergelijken en hun relatieve afstand tot de aarde te berekenen.

Als ze bijvoorbeeld twee cepheïden in verschillende hemelgebieden vond die wisselingen in helderheid vertoonden met dezelfde periode, dan wist ze dat deze sterren even fel straalden. Dus als je de ene ster 9 keer zwakker ziet dan de andere stond die ster 3 keer zo ver weg als de andere, want de helderheid neemt evenredig met het kwadraat van de afstand af.

Opgave 54

Leg uit waarom dat zo is.

Ze wist dus dat de ene ster 3 keer zo ver weg staat als de andere maar hoe ver staan die sterren nu echt bij ons vandaan? Om daarachter te komen had men van één cepheïde de echte afstand tot de aarde nodig.

Een team van astronomen lukte het om dat te doen met een combinatie van een aantal technieken, waaronder parallaxmeting. De meetlat van Henrietta Leavitt was geijkt! Intussen is van een aantal Cepheïden met de parallaxmethode de afstand gemeten. De twee methoden om afstanden te bepalen, de parallaxmethode en de Cepheïdenmethode zijn dus stevig aan elkaar gelinkt.

Opdracht 55

Bekijk deel 23 ‘Oneindig heelal’ (10 minuten) van de serie ‘Reis door de ruimte’ en vat dit deel samen in ½ A4-tje.

Opdracht 56: practicum

Het Europese ruimtevaartagentschap ESA heeft een site gemaakt, met daarop sterrenkundepractica aan de hand van echte opnamen van Hubble Space Telescope. Met vrij eenvoudige wiskunde kun je daar onderzoek doen aan afstandsmetingen in de ruimte.

Ga naar deze practica in de map ‘Practica’ en doe in overleg met je docent één van de drie practica.

11 DE OERKNAL

11.1 Einstein en Lemaître

Aan het begin van de twintigste eeuw hadden wetenschappers veel onderzoek aan aardlagen gedaan. Allerlei dateringsmethoden gaven aan dat de aarde tussen 1 en 2 miljard jaar oud was.

Het heelal moest dus nog ouder zijn. De meeste wetenschappers dachten dat het oneindig oud was. De theorie van een eeuwig universum had een zekere eenvoud en volledigheid. Je hoefde dan tenminste niet na te denken over een begin. Over hoe, wanneer en door Wie het heelal was geschapen.

Vrijdagmiddag bij astrofysica

Professor Stroo neemt even een pauze om een glas water te drinken.

Tom ziet zijn kans schoon en vraagt: 'Hoe kwamen ze op het idee van een eeuwig heelal?'

'Ja, Tom, eigenlijk waren er geen wetenschappelijke feiten, die dit idee ondersteunden. Het deed sommige wetenschappers vooral goed, dat ze een theorie van het universum hadden ontwikkeld waarin geen plaats meer was voor God.'

De situatie veranderde echter in de twintigste eeuw. Kosmologen ontwierpen en toetsten een groot aantal verschillende modellen voor het universum.

In die tijd kwam Einstein met zijn relativiteitstheorie. Deze leidde tot een heel andere kijk op de zwaartekracht. Tot dan toe gebruikte men de theorie van Newton over de gravitatiekracht. De twee theorieën geven dezelfde uitkomsten als de zwaartekracht niet zo groot is. Alleen bij immens grote massa's geven ze andere resultaten. Daarom richtte Einstein zijn aandacht op het heelal. Licht, dat langs een ster scheert zal worden afgebogen. Als wij op aarde vlak naast de zon een ster zien, die veel verder weg staat, dan passeert het licht van die ster de zon op zijn weg naar de aarde. Einstein voorspelde een afbuiging, die ongeveer twee keer zo groot is als de hoek, die Newton voorspelde. Een probleem is dat het licht van zo'n ster totaal wordt overstraald door het zonlicht. Daarom wachtte hij op een zonsverduistering. In 1919 werd de door Einstein voorspelde afwijking inderdaad gemeten. Dat was een bevestiging van de theorie van Einstein.

Tom merkt op: 'Die theorie van Einstein was dus bewezen'.

Aad Stroo antwoordt: 'Nee, Tom, daar is veel meer voor nodig. Een theorie kan niet worden bewezen'.

Er kwam bijvoorbeeld al een groot probleem naar voren toen Einstein zijn theorie toepaste in het heelal. Het heelal zou gevvaarlijk instabiel zijn. Alle objecten in het heelal trekken elkaar immers aan met als gevolg dat ze dichter naar elkaar toe bewegen. De wederzijdse aantrekking was misschien in een slakkengaangetje begonnen, maar zou zich geleidelijk ontwikkelen tot een lawine die zou eindigen met een gigantische ineinstorting. Het heelal zou zichzelf vernietigen.

Om dat te voorkomen haalde Einstein een wiskundige truc uit, die het heelal zou redden van de ondergang. Hij voerde een *kosmologische constante* in.

De kosmologische constante riep een nieuwe, onbekende kracht in het leven die de onderlinge gravitatiekracht van de sterren tegenwerkte.

De kosmologische constante was achteraf gezien niets anders dan een foefje om het gewenste resultaat te krijgen, namelijk een stabiel en eeuwig heelal.

De Russische wiskundige *Friedmann* begon in 1917 precies aan de andere kant. Hij liet de eis los dat het heelal stabiel en eeuwig moest zijn. Hij gebruikte de relativiteitstheorie in haar eenvoudigste en mooiste vorm zonder kosmologische constante en keek wat dat voor heelal opleverde.

Dat bleek een uitdijend heelal te zijn. Dus geen statisch heelal, maar een dynamisch, evoluerend universum. Dat heelal heeft in het begin een uitdijende impuls gekregen. De uitdijing zou door de zwaartekracht wel vertraagd worden, maar nooit helemaal tot stilstand komen. Zo zou het universum niet ineenstorten en niet eindeloos uitdijken. Zijn model raakte in de vergetelheid omdat hij niet in de juiste tijdschriften kon publiceren en omdat Einstein de vloer met hem aanveegde.

De Belgische priester en astronoom *Lemaître* volgde 8 jaar later dezelfde gedachtelin als Friedmann en kwam op hetzelfde model uit.

Lemaître was anders dan Friedmann vooral geïnteresseerd in het terugdraaien van de klok. Als het heelal uitdijt moet het gisteren kleiner zijn geweest dan vandaag en moet het vorig jaar nog kleiner zijn geweest. En als we nog verder terug gaan moet de hele ruimte ooit samengepakt zijn geweest in een piepklein gebiedje. Hij noemde dat het oeratom. Er is dus een *begin* geweest van het heelal.

In die tijd waren veel wetenschappers bezig met onderzoek aan kosmische straling, een geheimzinnige straling, die vanuit het heelal de aarde treft. Ook werd er veel onderzoek aan radioactiviteit gedaan.

Lemaître stelde zich voor dat het oeratom door een soort radioactief verval uiteen was gevallen en zich had verspreid. Daarbij zou de kosmische straling zijn ontstaan.

De modellen van Einstein en Lemaître waren geen van beide in tegenspraak met bekende natuurkundige wetten. Ze hadden beide als zwak punt dat ze niet werden ondersteund door waarnemingen of experimenten.

De wetenschappelijke wereld liet zich leiden door de roem van Einstein en gaf de voorkeur aan het eeuwige statische heelal boven het oeratommodel van Friedmann en Lemaître.

In de rest van de twintigste eeuw werden krachtiger telescopen gebouwd. Daarmee konden wetenschappers dieper de ruimte in kijken en daar aanwijzingen zoeken welk van de twee modellen juist was en welke onjuist.

Spectrum van een ster als de zon



Figuur 47

11.2 Dopplereffect

De theorie van de oerknal werd bevestigd door het meten van de snelheid van sterrenstelsels. Dat wordt gedaan aan de hand van het licht dat wij op aarde van de sterren ontvangen.

In het spectrum van dat licht komen bepaalde patronen van zwarte lijnen voor. Die ontstaan als het licht uit het binnenste van de ster naar buiten gaat. Zie figuur 47. Van het licht dat in het binnenste van de ster ontstaat is het spectrum continu: alle kleuren komen erin voor.

Dat licht gaat door de buitenste lagen van de ster op weg naar ons toe. Elke stof die in die lagen zit absorbeert bepaalde kleuren licht. Vandaar die zwarte lijnen.

Een bepaald lijnenpatroon is dus de ‘vingerafdruk’ van een element (bijvoorbeeld waterstof), dat in die ster voorkomt.

Ook op aarde kun je licht door waterstofgas laten gaan. Dan zie je eveneens zo’n lijnenpatroon in het spectrum. Omdat er op de zon veel waterstof aanwezig is krijg je bij de zon hetzelfde spectrum als bij waterstofgas op aarde. Vergelijk je dat spectrum echter met het spectrum van een ster die 1 miljard lichtjaar bij ons vandaan staat dan zie je in het spectrum van een ster de lijnen terug komen die je ook op aarde ziet. Alleen zijn die lijnen over een bepaalde vaste afstand verschoven, elke lijn evenveel. Zie figuur 48.

Spectrum van een ster als de zon



Spectrum van een ster als de zon, op 1 miljard lichtjaar



Figuur 48

Hoe kun je dat nu verklaren? Licht is net als geluid een golfverschijnsel. Wat bij geluid de toonhoogte is, is bij licht de kleur. De verschuiving van de lijnen in het spectrum van een ster betekent dat de ster een snelheid heeft naar de aarde toe of ervan af. Als de ster naar ons toe komt heb je een verschuiving naar de violette kant van het spectrum. Gaat de ster van je af dan heb je een roodverschuiving. Hoe groter de roodverschuiving, hoe groter de snelheid van het sterrenstelsel van ons af.

11.2 De wet van Hubble

Hubble ontdekte in 1930 bij ieder sterrenstelsel een roodverschuiving. De afstanden van sterrenstelsels kon hij bepalen met de Cepheïdenmethode. *Hubble* maakte een grafiek waarin hij de afstanden van 46 sterrenstelsels uitzette tegen hun roodverschuiving. Toen

viel hem iets verbluffends op: hoe groter de afstand van een sterrenstelsel tot de aarde, des te groter was zijn roodverschuiving. Een sterrenstelsel dat verder weg staat beweegt dus sneller van ons vandaan. Het is alsof de sterrenstelsels in het heelal alle kanten op stuiven.

Daaruit is de conclusie getrokken dat het heelal uitdijt. De ruimte wordt steeds groter en neemt de sterrenstelsels met zich mee. Vergelijk dat met een ballon, waar stippen op getekend zijn. Als je de ballon opblaast gaan alle stippen verder van elkaar. De oerknal is niet een soort explosie in een bestaande ruimte. Het is de ruimte zelf, die groter wordt. Daarom is dit een andersoortige roodverschuiving. Bij het ‘gewone’ dopplereffect beweegt een ster door het coördinatenstelsel van de melkweg. Deze snelheid kan volgens de relativiteitstheorie nooit groter zijn dan de lichtsnelheid.

Het dopplereffect, dat Hubble waarnam is echter een gevolg van het feit dat de ruimte zelf uitzet en daardoor de golflengte van de straling uitrekt. Deze snelheid kan wel groter zijn dan de lichtsnelheid. Wij ontvangen bijvoorbeeld licht, dat 13 miljard jaar geleden is uitgezonden. De fotonen van dat licht zijn gedurende zo’n 6 miljard jaar door het uitdijende heelal meegesleurd zodat ze van ons af bewogen. Toen daarna de uitzetting wat kalmer verliep, kregen de fotonen eindelijk snelheid in onze richting. Tegen de tijd dat de fotonen ons bereiken is hun golflengte sterk uitgerekt - en wel sterker naarmate ze van verder weg komen. Zie hiervoor verder:

<http://www.astroblogs.nl/2009/08/04/hoe-groot-is-het-heelal-eigenlijk/>

Opgave 57

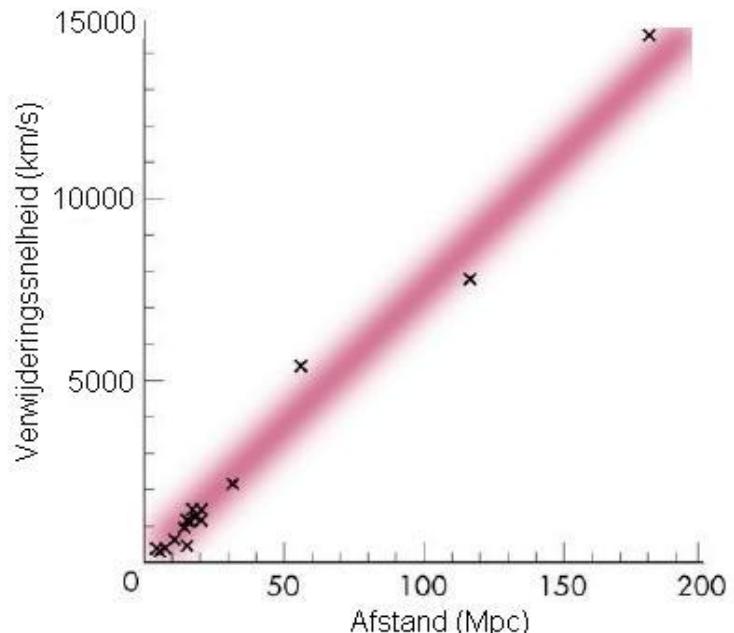
Hoe kan het dat sommige sterren toch een violetverschuiving vertonen?

De ontdekkingen van Hubble overtuigden een flink deel van de kosmologen ervan dat het heelal een begin moet hebben gehad. In 1931 nam Einstein afstand van zijn theorie van een statische kosmos en schaarde zich achter het model van het uitdijende heelal. Hij vond de waarnemingen van Hubble

overtuigend en erkende dat Lemaître en Friedmann feitelijk altijd al gelijk hadden gehad. Einstein dankte vervolgens de kosmologische constante af. Later noemde hij de kosmologische constante de grootste blunder van zijn leven.

Lang niet elke wetenschapper was gecharmeerd door het idee van een uitdijend heelal. Het leek velen net iets te veel op het scheppingsverhaal uit de Bijbel.

Een zwak punt was dat het heelal volgens de oerknalhypothese zo’n 2 miljard jaar oud was. Maar uit geologisch onderzoek was gebleken dat bepaalde rotsen op aarde naar



Figuur 49

schatting 3,4 miljard jaar oud waren. Er was dus een nogal pijnlijk verschil van 1,4 miljard jaar. Het model suggereerde dat het heelal jonger was dan de aarde!

De Britse sterrenkundige *Hoyle* vond het een onaantrekkelijk model, dat hij in een radiopraatje in 1950 smalend de ‘big bang theory’ noemde. Deze term is geleidelijk aanvaard door voor- en tegenstanders. De theorie dankt zijn naam dus aan een van de grootste critici ervan. Later zou men ontdekken, dat de naam ‘big flash theory’ beter zou passen. Er was namelijk geen geluid te horen, maar er was wel een enorme hoeveelheid straling bij betrokken.

Opgave 58

Later zijn de metingen aanzienlijk verbeterd met het volgende resultaat.

In de figuur hiernaast is elk punt van de grafiek een sterrenstelsel. De afstand langs de horizontale as is uitgedrukt in Mpc = MegaParsec.

1 Parsec = $3,09 \cdot 10^{16}$ m. Uit de grafiek volgt de wet van Hubble: $v(r) = H_0 \cdot r$

waarin:

$v(r)$ = de snelheid waarmee het sterrenstelsel zich van ons verwijdert in kilometer per seconde (km/s)

r = de afstand tot de Aarde in Megaparsec (Mpc)

H_0 = de Hubbleconstante in kilometer per seconde per Megaparsec (km·s⁻¹ ·Mpc⁻¹).

a. Bepaal met behulp van de grafiek de waarde van de Hubbleconstante.

b. Bereken hiermee de ouderdom van het heelal. Later is de waarde van de Hubbleconstante vastgesteld op 53 ± 5 km·s⁻¹ Mpc⁻¹.

c. Bereken hiermee de ouderdom van het heelal met zijn marge.

Later is de schatting van de leeftijd van het heelal door metingen met behulp van satellieten bijgesteld tot 13,7 miljard jaar.

Opdracht 59

Maak met behulp van internet een ‘paspoort’ van de personen, die tot nu toe in dit hoofdstuk een rol hebben gespeeld. Dat zijn Leavitt, Einstein, Friedmann, Lemaître, Hubble en Hoyle.

In dat paspoort moeten staan:

- a. geboortedatum en plaats
- b. sterfdatum
- c. opleiding en werkkering
- d. wetenschappelijke resultaten
- e. anekdotes uit hun leven.

Opdracht 60

Bekijk deel 22 ‘Het oog van Hubble’ (10 minuten) uit de serie ‘Reis door de ruimte’ en vat dit deel samen in ½ A4-tje.

11.2 Nucleosynthese tot Helium

Wilde het oerklaratie model aanvaard worden, dan moest er eerst een opvallend onbetekenende vraag worden beantwoord: hoe komt het dat sommige stoffen meer voorkomen dan andere?

Als we naar onze eigen planeet kijken is het zo dat de kern van de aarde bestaat uit ijzer. Zuurstof, silicium, aluminium en ijzer zijn de meest voorkomende elementen in de aardkorst. Tom, jouw steen bestaat voornamelijk uit de elementen calcium, koolstof en zuurstof.

De oceanen zijn grotendeels opgebouwd uit waterstof en zuurstof. De atmosfeer bestaat bijna helemaal uit stikstof en zuurstof.

Dat is niet de verdeling, die we wat verder van huis aantreffen. Met behulp van de spectra van sterren kwamen astronomen erachter, dat waterstof het meest voorkomt in het heelal en dat helium een goede tweede is. Waterstof en helium vormen 99,9% van alle atomen in het heelal. Het heelal bestaat dus voornamelijk uit kleine atomen.

Wetenschappers begonnen zich af te vragen, waarom de zware elementen zo zeldzaam zijn in het heelal.

De aanhangers van het model van een eeuwig universum hadden geen duidelijk antwoord. De huidige onderlinge verhoudingen hadden simpelweg altijd al zo bestaan en zo zou het eeuwig blijven.

Het raadsel van die scheve verhouding bezorgde de aanhangers van de oerklaratie meer hoofdbrekens. Hoe kan het universum zo geëvolueerd zijn, dat er veel meer waterstof en helium was ontstaan dan goud en platina?

Het oplossen van dit raadsel zou een heel andere aanpak vragen dan kosmologen tot nu toe hadden gehanteerd. In het verleden hadden ze zich gericht op het gigantisch grote. Nu moesten ze zich gaan bezighouden met het onvoorstelbaar kleine, atomen.

In die tijd is er in de kernfysica veel onderzoek gedaan naar de bouw van atomen.

Kernsplijting en kernfusie werden ontdekt. Het was de tijd van de Tweede Wereldoorlog, waarin voor het eerst een atoombom werd gebruikt.

De kernfysica leverde de volgende resultaten op:

- Atomen bestaan uit elektronen, protonen en neutronen.
- Protonen en neutronen vormen de kern van het atoom en elektronen cirkelen om de atoomkern.
- Grote kernen zijn vaak instabiel en kunnen uiteenvallen. Dat noem je kernsplijting.
- Kleine kernen zijn wel stabieler, maar deze kun je laten samensmelten. Dat is kernfusie.
- Bij splijting en fusie neemt de massa af.
- Dit verschil in massa wordt volgens de formule $E = m \cdot c^2$ omgezet in energie.
- Lichte kernen zijn pas tot fusie te brengen door toevoeging van veel energie en onder hoge druk.
- Middelzware kernen (zoals ijzer) zijn het stabieler en ondergaan zelden kernreacties.

Deze kennis werd eerst toegepast om te begrijpen waar de energie van de zon vandaan komt. Daarna werd het werkterrein uitgebreid tot het heelal.

Het kwam er nu op aan om zo nauwkeurig mogelijk vast te stellen wat de omstandigheden waren geweest in het jonge heelal, omdat de uitkomst van een kernfusiereactie vrijwel volledig afhangt van de dichtheid en de temperatuur. De dichtheid geeft het aantal atomen in een bepaald volume weer. Hoe groter de dichtheid, hoe groter de kans is dat twee kernen op elkaar botsen en fuseren. En als de temperatuur stijgt is er meer energie beschikbaar omdat de kernen sneller gaan bewegen wat de kans op kernfusie opnieuw vergroot.

Men ging uit van de huidige dichtheid en gemiddelde temperatuur van het heelal en rekende terug naar het begin. De dichtheid zal dan enorm groot zijn. Bij samenpersen van een gas stijgt de temperatuur. De temperatuur zal in het jonge heelal dus veel hoger zijn geweest. Die temperatuur was zo hoog, dat er geen atomen kunnen bestaan, alleen losse protonen, neutronen en elektronen. Deze bewegen zo immens snel, dat ze zich niet aan elkaar kunnen hechten. Bovendien was er in het jonge heelal nog een woeste zee van straling, bestaande uit fotonen.

In 1945 stelden onderzoekers zich het jonge heelal dus voor als een dichte en zeer hete soep van protonen, neutronen en elektronen. Dit is een bijzondere toestand van de materie, die plasma genoemd wordt.

Berekeningen gaven aan dat 5 minuten na de oerknal het heelal voor 90% uit waterstof en voor bijna 10% uit helium bestond. Dat is precies de verhouding, die we nu nog aantreffen in het heelal.

In deze fase van de uitdijing leek het heelal op het inwendige van een ster. Het was een krioelende massa van protonen, heliumkernen, elektronen en fotonen. De fotonen kwamen voortdurend in botsing met de elektronen. Daardoor konden de elektronen zich niet binden aan de kernen.

De fotonen bewogen in willekeurige richtingen door de ruimte in een soort mist, waarbij ze steeds opnieuw werden geabsorbeerd door elektronen en in een willekeurige richting weer uitgezonden.

Door de uitdijing van het heelal nemen dichtheid en temperatuur zover af, dat elektronen en protonen zich wel aan elkaar gaan hechten. De lichte atomen waterstof en helium worden geboren ongeveer 3 minuten na de oerknal.

Naarmate de dichtheid en temperatuur van het heelal afnamen liep het aantal botsingen tussen fotonen en deeltjes flink terug. Hierdoor trok na ongeveer 300 duizend jaar de kosmische mist op. De fotonen konden nu plotseling ongehinderd door de ruimte bewegen. Het heelal was *doorzichtig* geworden. Men heeft berekend, dat dit gebeurde bij een temperatuur van $3 \cdot 10^3$ K.

11.3 De kosmische achtergrondstraling

De straling, die toen door het heelal reisde kwam zo weinig deeltjes tegen, dat die fotonen nog steeds bestaan en waargenomen kunnen worden als een echo van de oerknal. Dit noem je de kosmische achtergrondstraling.

Dit is het jongste moment, dat we terug kunnen kijken. Ongeveer in 1950 werd het bestaan van deze straling voorspeld op grond van het oerknalmmodel. Die zou van alle kanten moeten komen omdat de straling op het moment, dat elektronen en protonen aan elkaar hechten overal in het heelal voorkwam.

Opgave 61

- bereken de golflengte van deze straling bij een temperatuur van $3 \cdot 10^3$ K.
- In welk stralingsgebied zit deze straling volgens Binas tabel 19B?

Deze kosmische achtergrondstraling zou dus veel ouder zijn dan de eerste sterrenstelsels. Het heelal was nu wel doorzichtig geworden, maar er was niet echt veel te zien. Sterren bestonden nog niet om licht te geven in het heelal. We noemen dit de donkere periode. De kosmische achtergrondstraling had een kleine golflengte. Intussen is het heelal ongeveer duizend keer zo groot geworden. De golflengte is duizend keer zo groot geworden en de stralingstemperatuur is duizend keer zo klein geworden, dus ca 3 K.

Opgave 62

Verklaar nu waarom die achtergrondstraling CMBR wordt genoemd, Cosmic Microwave Background Radiation.

Vrijdagmiddag bij astrofysica

Tom: 'Dus iedereen was nu overtuigd van het oerknalmmodel?'

'Nee, Tom, zo snel ging dat niet. Er verschenen wel koppen in de krant met 'WERELD ONTSTAAN IN VIJF MINUTEN', maar lang niet iedereen was overtuigd. Niemand ging op zoek naar de achtergrondstraling. Er waren nog een paar andere hardnekkige problemen voor de oerknal. Ten eerste wezen metingen van roodverschuivingen uit dat het heelal jonger was dan de geschatte ouderdom van de sterren en dat is natuurlijk absurd. Dat noem je het tijdschaalprobleem. Ten tweede kon niemand verklaren waar de zwaardere elementen dan helium waren ontstaan'.

Opdracht 63

Zoek uit hoe het tijdschaalprobleem is opgelost met behulp van de onderscheiding van populatie-I en populatie-II Cepheïden in de Andromedanevel.

11.4 Het steady-state model

In deze tijd werd een belangrijke concurrent voor het oerknalmmodel naar voren gebracht, het steady-state model van Hoyle. Dit model beschreef een oneindig groot heelal, dat uitdijde maar toch in wezen eeuwig en onveranderlijk was. Op het eerste gezicht sluiten die eigenschappen elkaar uit. Als het heelal groter wordt, zou het minder dicht worden en dus veranderen. In het model zit echter een effect, dat de verdunnende werking van de uitdijing tegen gaat. Het heelal zal in de groeiende gaten tussen de vluchtende sterrenstelsels als tegenwicht tegen de uitdijing nieuwe materie creëren. Daardoor blijft de algehele toestand van het heelal hetzelfde.

Dit model was dus in overeenstemming met de waarnemingen van Hubble van roodverschuivingen. Het verving het model van het statische heelal.

De keuze was nu helder. Het oerknalmmodel ging uit van een begin, een eindige geschiedenis en een toekomst, die er heel anders uitziet dan het verleden. Het steady-

state heelal kende een permanent scheppingsmodel, een eeuwigdurende geschiedenis en een toekomst die er in grote lijnen hetzelfde uitziet als het heden.

Hoyle kwam zelf op de proppen met een beslissende test die zou bewijzen, dat hij gelijk had. Volgens het steady-state model zou er overal in het heelal materie ontstaan, waaruit zich in de loop van de tijd sterrenstelsels zouden vormen. Die jonge sterrenstelsel zouden we dus overal in het heelal moeten aantreffen.

De oerklontheorie voorspelde echter iets heel anders. Alleen vlak na de oerknal waren er jonge sterrenstelsels. Daarom zou een jong sterrenstelsel vandaag alleen te zien zijn met een buitengewoon sterke telescoop die kon kijken tot in de verste uithoeken van het heelal. Dit komt omdat het licht dat is uitgezonden door een heel ver verwijderd sterrenstelsel er zo lang over heeft gedaan om ons te bereiken, dat we het feitelijk zouden zien zoals in het verre verleden, toen het nog piepjong was.

Pas omstreeks 1960 ontdekte men met radiotelescopen jonge sterrenstelsels, meestal in de verste uithoeken van het heelal. Deze ongelijke verdeling van jonge sterrenstelsels was in tegenspraak met het steady-state model, dat stelde dat het heelal er overal ruwweg hetzelfde uitziet.

De waarneming was wel volledig in overeenstemming met het oerklon model.

11.5 Nucleosynthese van zwaardere elementen

De donkere periode duurde ongeveer 400 miljoen jaar. Voordat de oudste sterren ontstonden moest de materie in het heelal onder invloed van de zwaartekracht samenklonteren. Pas toen de dichtheid van die materie-ophopingen hoog genoeg werd om sterren te vormen begon het heelal zijn huidige vorm aan te nemen.

Het licht dat sterren uitstralen bevat heel veel informatie over hun samenstelling en temperatuur. De processen binnen sterren begrijpen sterrenkundigen daarom redelijk goed. Een ster doorloopt een hele geschiedenis van samentrekkingen en explosies. Bij de samentrekkingen wordt de temperatuur zo hoog, dat in de stellaire fusie-ovens ook zwaardere elementen dan helium kunnen worden gevormd. In eerste instantie stopt dat proces bij het stabiele ijzer.

Opdracht 64

Een struikelblok was jarenlang de verklaring van de vorming van koolstof uit helium. Het ‘koolstofknelpunt’. Zoek informatie over dit proces op en geef antwoord op de volgende vragen:

- a. Waarom kan koolstof niet rechtstreeks uit helium fuseren (het tripel-alfa proces)?
- b. Waarom is de weg via beryllium-8 heel moeilijk?
- c. Welke voorspelling deed Hoyle om die weg wel mogelijk te maken?
- d. Na hoeveel tijd werd die voorspelling bevestigd door onderzoek?

Sommige grote sterren ontwikkelen zich tot een supernova. De kern van de ster stort in. We noemen dat een implosie. Op het moment dat de buitenste gasschillen van de ster vervolgens met hoge snelheid op de compacte kern botsen, vindt een extreme explosie plaats, waardoor tevens het grootste deel van de materie het heelal in wordt geblazen.

Een supernova is herkenbaar aan de enorme hoeveelheid licht die hij uitstraalt. De ster vlamt op met de lichtkracht van honderden miljoenen tot meer dan een miljard zonnen. Grote hoeveelheden atomen worden de ruimte in geslingerd. Sommige van die atomen zijn ontstaan tijdens de kernreacties in de laatste levensfasen van de ster. Dat zijn de elementen zwaarder dan ijzer. Die ontstaan niet door kernfusie, maar onder andere door het invangen van grote hoeveelheden neutronen.

Opdracht 65

Ga naar <http://www.scienceinschool.org/print/411> en beantwoord de volgende vragen

- a. Welke drie processen kun je onderscheiden bij de nucleosynthese van zware elementen?
- b. Wat is bindingsenergie?
- c. Wat gebeurt er bij een supernova-explosie?
- d. Wat is de Coulombgrens?

Het stof, dat bij de explosie de ruimte in geslingerd wordt kan zich onder invloed van de zwaartekracht verdichten tot nieuwe sterren. Wat over is klontert samen tot planeten. Zo is ook de aarde ontstaan.

Opdracht 66

- a. Zoek uit wat tweede en derde generatie sterren zijn.
- b. Van welke generatie is de zon? Waarom?

Vrijdagmiddag bij astrofysica

Na deze lange uiteenzetting keek professor Stroo Tom aan:

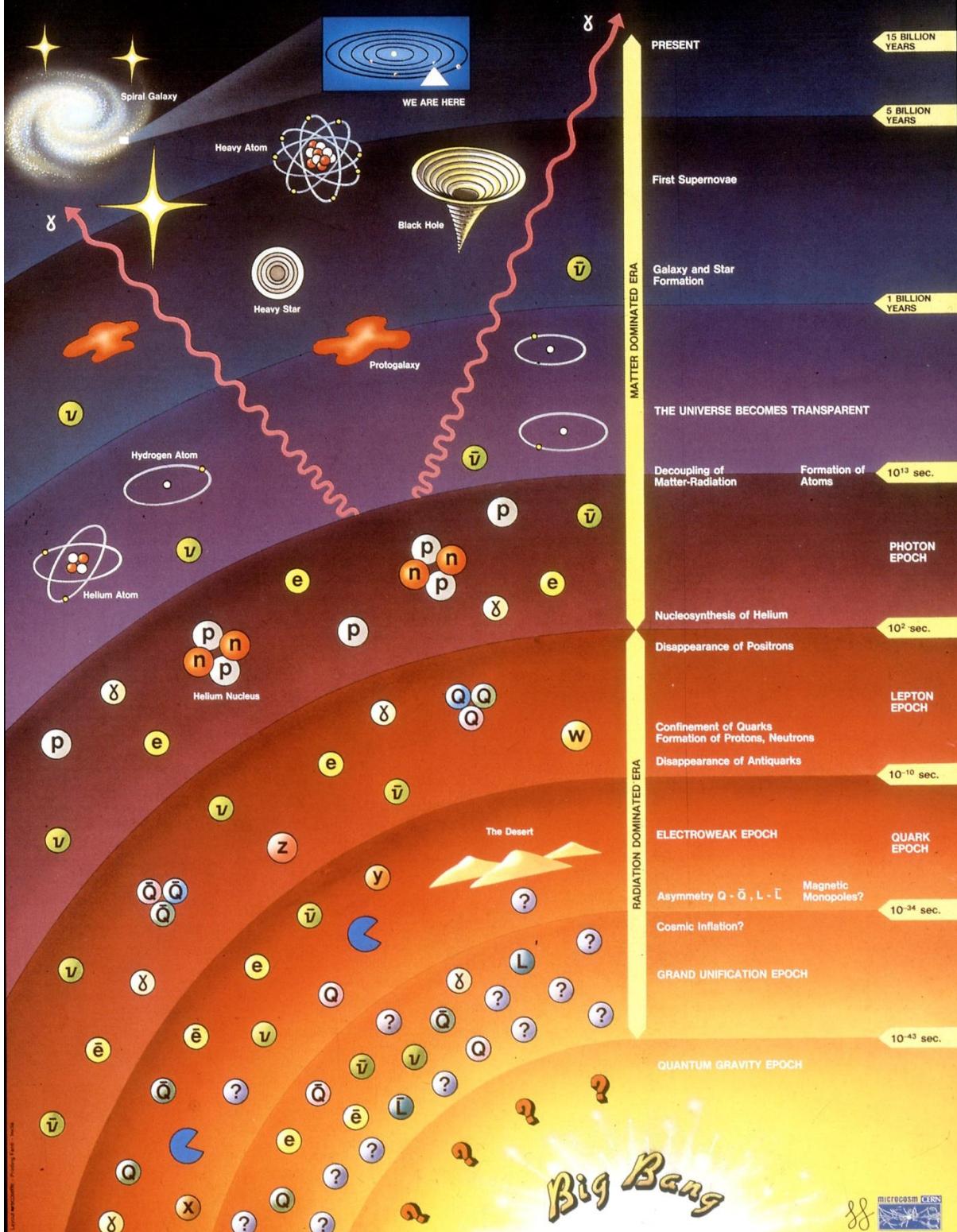
Tom, jouw steen met fossiel bestaat dus uit sterrenstof. Of uit karnaval, het is maar hoe je er tegenaan kijkt.

<http://www.kennislink.nl/publicaties/beryllium-datering-geeft-leeftijd-melkweg>

De eerste supernovae van de melkweg zijn zo'n 13,4 miljard jaar oud. Het kan dus best zo zijn, dat de elementen in jouw steen ruim 13 miljard jaar oud zijn, Tom.'

'Ik ben je nog één verhaal schuldig en dat is hoe het afliep met de kosmische achtergrondstraling.'

History of the Universe



Figuur 50

11.6 CMBR

In de loop van de twintigste eeuw ging men op allerlei manieren naar het heelal kijken. Niet alleen zichtbaar licht was interessant, maar ook de röntgenstraling en radiostraling. Met grote radiotelescopen werd de hemel afgespeurd naar signalen.

Daarbij had men last van een hardnekkige ruis. Als je op de radio afstemt op een heel zwakke zender hoor je een soort constant sisgeluid. Bij zeer zwakke zenders hoor je dan zelfs het signaal van de zender niet meer. Dat noem je ruis.

In de radioastronomie is ruis een groot probleem omdat signalen van zeer verre sterrenstelsels daardoor helemaal weggedrukt kunnen worden.

In 1964 onderzochten twee onderzoekers, *Penzias en Wilson*, de oorzaak van de ruis. Zij richtten hun radiotelescoop op een deel van de hemel zonder sterrenstelsels. Dan kun je alleen maar ruis waarnemen. Ze dachten dat ze bijna niets zouden waarnemen. Tot hun verrassing maten ze een flinke hoeveelheid ruis.

Een jaar lang waren ze bezig met het uitsluiten van alle mogelijke bronnen van ruis. Ze dachten op een bepaald moment dat het een storing was, die veroorzaakt werd door de uitwerpselen van een paartje duiven, dat nestelde in de radiotelescoop. Na reiniging van de telescoop bleek het signaal echter niet verdwenen.

Wat ze ook deden er bleef altijd een constante ruis, die vanuit alle richtingen door hun telescoop werd waargenomen.

Bij toeval hadden ze één van de belangrijkste ontdekkingen in de kosmologie gedaan. De kosmische achtergrondstraling, die Hoyle in 1950 voorspelde, werd pas in 1965 ontdekt door twee radioastronomen, die er niet naar op zoek waren. Een verbluffend staaltje van serendipiteit.

Opdracht 67

- a Zoek op wat serendipiteit (serendipity) is.
- b Noem nog drie andere voorbeelden van serendipiteit.

Opdracht 68: practicum

Radioastronomie is een zeer belangrijk hulpmiddel in de sterrenkunde geworden.

Ga naar de map ‘Practica’ en doe het practicum radioastronomie ZON.

Daarin ga je real-time een signaal van een radiotelescoop binnenhalen en informatie uit het signaal halen.

Opdracht 69: Practicum Andromeda

Ga naar de map ‘Practica’ en doe het practicum radioastronomie ANDROMEDA.

Daarin kun je ervaren hoe radioastronomie samen met het dopplereffect kan worden gebruikt om de beweging van het Andromeda sterrenstelsel te analyseren.

Opdracht 70

Bekijk de volgende site:

<http://www.kennislink.nl/publicaties/waar-komt-het-heelal-vandaan>

Speel de 5 filmpjes af en geef bij elk filmpje een samenvatting in 10 zinnen.

Vrijdagmiddag bij astrofysica

Oom Tom vraagt : 'Was nu de paradigmawisseling compleet?'

'Ja', antwoordt prof Stroo 'De meeste sterrenkundigen waren nu wel overtuigd. Bijna alle astronomen denken dat het heelal ontstaan is door de oerknal'.

Tom kijkt twijfelend naar de professor: 'Bekent dat nu ook, dat het oerknalmoeid op alle vragen een antwoord geeft?'

'Nee, Tom, er zijn zeker nog grote problemen voor de oerknal. Ik noem er een paar.'

11.7 Problemen voor de oerknal

Donkere materie

Het heelal bevat te weinig materie. Ons heelal dijt uit met een bepaalde snelheid. Die snelheid is alleen maar mogelijk als we aannemen dat zichtbare materie niet meer dan 4% van de totale massa vormt. Een theorie die 96% van alle materie kwijt is, is natuurlijk niet zo overtuigend. Astrofysici hebben dit probleem 'opgelost' door aan te nemen dat er 'donkere materie' is. Deze materie is donker omdat hij geen enkele vorm van straling uitzendt. Hij kan dus ook niet met telescopen worden waargenomen. De enige manier is om te kijken naar zwaartekrachteffecten op sterren die wel zichtbaar zijn. Er zijn tot nu toe alleen maar vage aanwijzingen voor het bestaan van donkere materie.

Zelfs met donkere materie heb je nog maar 27% van de totale massa. De rest zou geleverd worden door donkere energie.

Donkere energie

Uit waarnemingen komen tot verrassing van kosmologen aanwijzingen dat de snelheid, waarmee het heelal uitdijt, niet afneemt of constant is geworden, maar toeneemt. Dat vraagt om een uiteendrijvende kracht. Die wordt volgens sommigen geleverd door donkere energie. Dat is helemaal een raadselachtige grootheid. Donkere energie heeft ook geen zwaartekrachteffecten, dus kan waarschijnlijk helemaal niet worden waargenomen.

Hoe ontstonden de eerste sterren?

Volgens het model van de Big Bang zou de materie gelijk verdeeld alle kanten op gaan. Het is dan absoluut niet verklaarbaar dat de dichtheid op sommige plaatsen groter zou zijn dan ergens anders. Waarom zouden er dan sterren zijn ontstaan? Eigenlijk zou je een egaal, saai heelal verwachten met overal een paar waterstof- en heliumatomen per m³.

Opdracht 71

Bekijk deel 24 'De oerknal'(10 minuten) en deel 25 'Zwarte gaten en donkere materie' van de serie 'Reis door de ruimte' en maak van beide een samenvatting op 1 A4.

Opgave 72

a Wat is het antropisch principe?

b Wat was de aanleiding om het antropisch principe te formuleren?

c Wat is de betekenis van de theorie van de multiversa in dit verband?

SMS van Tom op vrijdagmiddag 21 oktober.

Hoi Ma. Vandaag bij afdeling kosmologie geweest. Gepraat met prof Aad Stroo. Volgens hem is de steen 9 miljard jaar oud. Wordt steeds ouder. Begon met 13 jaar. Met enkel gaat het steeds beter. Nog maar 1 kruk. Hoe is het bij jullie? Morgen weer naar huis? Groetjes, Tom.

Deel 5: Filosoferen over wetenschap

Opzet van dit deel:

We hebben ingezoomd op een aantal wetenschappen, die uitspraken kunnen doen over leeftijden. Nu zomen we uit en kijken hoe wetenschap eigenlijk werkt.

In de natuurwetenschappelijke methode neemt de hypothese een centrale plaats in. We zien hoe een hypothese wordt getoetst. Hierbij wordt duidelijk dat een hypothese niet waar kan zijn, maar hoogstens bruikbaar.

Het positivisme beweert dat wetenschap objectief en onbevooroordeld kan en moet werken. Hierop is zeer veel kritiek gekomen. Deze kritiek passeert de revue.

Leerdoelen:

Je kent het schema van de natuurwetenschappelijk methode.

Je kunt het verschil aangeven tussen inductie en deductie.

Je kent de begrippen falsificatie, confirmatie, reproduceerbaarheid, axioma en empirisch.

Je weet wat het positivisme beweert.

Je kunt 6 kritiekpunten op het positivisme noemen en toelichten. Je kunt hierbij de begrippen abstraheren, theorie-geladen, paradigma, selectie en reductionisme gebruiken.

12 WAT IS WETENSCHAP?

Vrijdagavond in het appartement van oom Tom

Vanmiddag hebben ze professor Aad Stroo hartelijk bedankt voor het college ‘oerknal’.

Nu zitten Tom en zijn oom gezellig met de benen op tafel en de steen tussen hen in.

‘Nou, Tom, we hebben vandaag heel veel informatie over ons uitgestort gekregen. Die steen is wel heel erg oud geworden, hè?’

‘Ja, dat klopt. Toch vielen me wel wat dingetjes op in dat verhaal van die prof.’

‘Ik zag je zo nu en dan al een beetje bedenkelijk kijken. Wat viel je dan op?’

‘Dat er echt heel wat voor nodig is om een theorie te bewijzen. Die prof zei zelfs dat je een theorie niet kan bewijzen. Ik vind het ook raar, dat wetenschappers zoals Einstein zo lang aan een achterhalde theorie vasthouden. En wat betekent dat woord paradigma nou eigenlijk?’

‘Dat zijn wel veel vragen in één keer, Tom. Je hebt wel goed geluisterd, zeg. Hiermee kom je op mijn terrein. Weet je eigenlijk wel wat ik zo iedere dag doe?’

‘Nou, oom, ik weet dat je iets met filosofie doet, maar wat precies?’

‘Juist, neef, ik werk bij de afdeling Wetenschapsfilosofie. Wij denken na over de manier waarop de wetenschap werkt. Hoe kom je tot resultaten en wat zijn natuurwetten? Dat soort dingen. Dus jouw vragen zitten precies op mijn terrein. Als het je interesseert wil ik er wel wat meer over vertellen’.

‘Ik zie dat je zit te popelen, dus brand maar los.’

12.1 De hypothese

Voor een kennismaking met de werkwijze van de moderne natuurwetenschapper is het volgende simpele verhaaltje een goed startpunt:

Een kleine jongen verdwaalde in het bos en moest daar de nacht doorbrengen. Omdat het erg koud was, ging hij op zoek naar allerlei dingen, waarvan hij een vuurtje zou kunnen maken. Hij verzamelde een oude tafelpoot, een paar takken, een potlood en omdat hij lucifers in zijn zak had, kon hij daarvan een lekker kampvuurtje maken. Hij gooide ook een steen op het vuur, maar ontdekte dat die niet brandbaar was. Op grond van zijn waarnemingen veronderstelde hij, dat cilindervormige voorwerpen kunnen branden.

Zo'n veronderstelling heet een *hypothese*. De volgende dag begon de jongen dadelijk nieuwe brandstoffen te zoeken en te verzamelen en bracht bij elkaar: een fles, een leeg conservenblikje, een bloempot en een buis van het frame van een fiets. Tot zijn teleurstelling konden deze voorwerpen geen van alle branden, hoewel hij er juist voor gezorgd had dat ze allemaal de cilindervorm hadden.

Zijn veronderstelling (hypothese) is duidelijk onwaar gebleken. We zeggen: zijn hypothese is *gefalsificeerd*.

Omdat de jongen zich nog herinnerde, welke voorwerpen de vorige nacht wel konden branden, flitste er ineens een nieuwe gedachte door hem heen: misschien zijn houten voorwerpen brandbaar (nieuwe hypothese). Hij ging dit nu uitproberen, zocht allerlei afval van hout en het bleek, dat inderdaad al deze voorwerpen brandden, ook al waren ze niet cilindervormig.

De tweede veronderstelling (hypothese) van de jongen werd dus bevestigd door zijn experimenten. We zeggen: zij werd *geconfermeerd*. Maar niet bewezen en ook onbewijsbaar is dat deze veronderstelling juist is. Ze is wel *bruikbaar*, zolang ze niet onwaar gebleken (gefalsificeerd) is. Er hoeft maar één stuk hout gevonden te worden dat niet brandbaar blijkt te zijn en de hypothese is gefalsificeerd.

Het natuurwetenschappelijk onderzoek verloopt volgens velen in twee fasen. De eerste fase loopt van het begin van het onderzoek (het waarnemen van de verschijnselen) tot aan het opstellen van de hypothese.

Men noemt dit wel de *inductieve fase* van het onderzoek.

De tweede fase bestaat uit het toetsen van de hypothese. Men noemt dit wel de *deductieve fase* van het onderzoek.

12.2 De inductieve fase

In het verhaaltje heeft de jongen al achtergrondkennis over het verband tussen het branden van materialen en vuur en warmte. Hij heeft immers al eerder vuur gezien en de warmte gevoeld. Uitgaande van die kennis begint hij nu zijn onderzoek met het opzetten van proeven, experimenteren en het verrichten van waarnemingen.

Waarnemen doen we met onze zintuigen. Een beschrijving van die waarneming is een *natuurwetenschappelijk feit*. Zo heeft de jongen door middel van experimenteren en waarnemen ondermeer de volgende feiten ontdekt: de oude tafelpoot is brandbaar, de steen is niet brandbaar.

Andere voorbeelden van feiten zijn:

- een onderzochte hoeveelheid water bevriest bij 0 °C;

- een stuk hout drijft op water maar een stuk ijzer zinkt;
- van een onderzochte sodaoplossing is de pH = 11,6;
- door een draad blijkt een stroom te gaan van 2,4 A.

Voor veel natuurwetenschappelijke experimenten is het verrichten van waarnemingen en ook het beschrijven ervan geen eenvoudige zaak. Aan de beschrijving van een waarneming kan al heel wat theorie ten grondslag liggen. Als je meet dat er een stroom van 2,4 A door een draadje gaat is dat alleen mogelijk als je een heleboel theorie over elektriciteit en magnetisme accepteert. Op grond van die theorie werkt namelijk de ampèremeter, die je gebruikt.

Op grond van beschreven waarnemingen verricht de natuurwetenschapper creatief denkwerk en zo komt hij tot een hypothese. Al denkend tracht hij een verklaring te vinden voor feiten. Hij probeert een uitspraak te doen, die voor een veel breder gebied opgaat dan voor de paar experimenten, die hij heeft verricht. Met andere woorden: hij probeert zijn hypothese zo algemeen geldig mogelijk te maken.

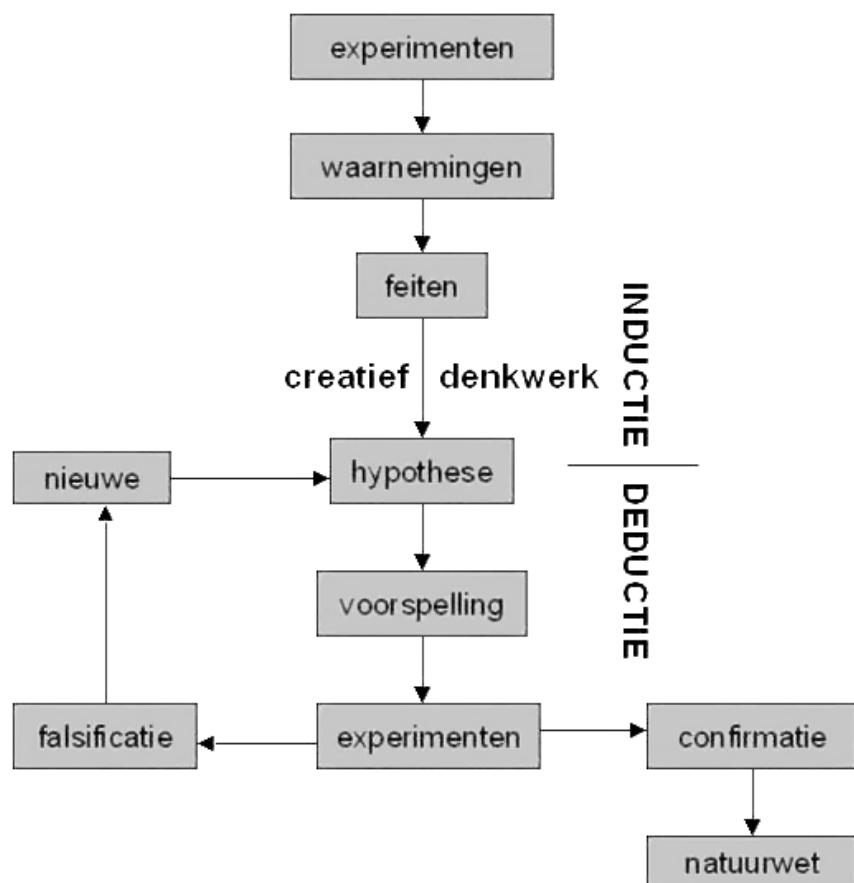
Men noemt dit de *inductieve methode*. Vanuit enkele bijzondere gevallen komt hij tot een algemene uitspraak. De manier waarop de inductieve methode te werk gaat, wordt daarom ook wel aangeduid met de term "*generaliseren*" (= algemeen maken).

Uit het voorgaande zal duidelijk zijn dat van een hypothese, op het moment dat ze wordt opgesteld, nog helemaal niet gezegd kan worden of hij juist of onjuist is. Toen de jongen zijn eerste hypothese formuleerde: "*cilindervormige voorwerpen zijn brandbaar*", besefte hij dat die uitspraak op dat moment niet meer dan een veronderstelling was, die getoetst moest worden.

Van een hypothese staat dus niet bij voorbaat vast of deze waar is. Sterker nog: je weet nooit zeker of hij waar is. Daarom is het juist een hypothese. De hypothese volgt immers niet via logische redeneringen uit de feiten. Men spreekt daarom wel van een zwakke schakel in de inductieve keten.

De meeste natuurwetenschappers willen pas van feiten spreken als zij *reproduceerbaar* (= herhaalbaar) zijn. Als de onderzoeker zelf of een andere onderzoeker het experiment onder dezelfde omstandigheden herhaalt, moet er steeds hetzelfde resultaat uitkomen. Pas dan kun je spreken van een uit experiment en waarneming verkregen feit. De vraag naar de reproduceerbaarheid komt steeds aan de orde bij de bespreking van proefresultaten. De reproduceerbaarheid is bij waarnemingen in de sterrenkunde een moeilijk punt. Een astronoom is afhankelijk van wat er voor zijn telescoop komt. Hij kan meestal niet zelf een experiment opzetten.

In het schema hieronder wordt de natuurwetenschappelijke methode samengevat.



Figuur 51

Verderop zullen nog enkele vragen met betrekking tot de inductieve fase aan de orde komen.

12.3 De deductieve fase

Als de hypothese geformuleerd is volgt de deductieve fase. De term 'deductie' betekent: men gaat van het algemene naar het bijzondere. Men gaat uit van een algemene uitspraak en leidt daaruit langs logische weg allerlei stellingen af voor bijzondere gevallen.

In de **wiskunde** gaat men voornamelijk te werk volgens de deductieve methode. Men gaat uit van **axioma's**. Dat zijn algemeen aanvaarde en meestal zonder meer duidelijke uitspraken. Bijvoorbeeld: door 2 punten gaat maar één rechte lijn. Men leidt uit axioma's stellingen af met behulp van logische redeneringen.

Er is in het werk van een natuurwetenschapper eerst een inductieve fase en daarna een deductieve fase. Het eind van de inductieve fase wordt bereikt met het opstellen van de hypothese. In de deductieve fase wordt de hypothese vervolgens onderworpen aan zo streng mogelijke toetsen. Men gaat nu uit de hypothese langs deductieve weg, dus via logische redeneringen, uitspraken afleiden. ***De hypothese gebruik je als een soort axioma.***

We gaan nu even terug naar het verhaaltje, dat aan het begin verteld werd. De jongen in dat verhaaltje ging uit de hypothese 'cilindervormige voorwerpen kunnen branden' allerlei voorspellingen afleiden, zoals: een fles is brandbaar, een conservenblikje is brandbaar, een bloempot is brandbaar, een framebus van een fiets is brandbaar. Deze voorspellingen, die logisch volgden uit zijn hypothese, moesten uiteraard juist zijn als zijn hypothese juist was. Om meer te kunnen zeggen over de waarde van zijn hypothese, moest de jongen nagaan of de voorspellingen klopten met de werkelijkheid. Met andere woorden: de jongen moest experimenten uitvoeren en waarnemingen verrichten.

Het uit de hypothese afleiden van voorspellingen en het uitvoeren van de experimenten noem je samen **het toetsen of verifiëren van de hypothese**.

Als resultaat van het toetsen zijn er twee mogelijkheden: de hypothese is **gefalsificeerd** (= onwaar bevonden) of de hypothese is (nog) niet gefalsificeerd. Een hypothese is gefalsificeerd als experimenteel blijkt dat één van de voorspellingen die logisch uit de hypothese volgen, niet klopt. In ons voorbeeld merkte de jongen dat meerdere voorspellingen niet klopten. Het is dus goed mogelijk te bewijzen dat een hypothese onwaar is, een onjuiste uitspraak is. In dat geval is de hypothese verworpen en moet je via creatief denkwerk trachten een andere, hopelijk betere hypothese maken. Die moet dan op zijn beurt weer getoetst worden.

De jongen in ons voorbeeld ging op deze manier te werk. Uit zijn tweede hypothese 'houten voorwerpen zijn brandbaar' trok hij logische conclusies, weer in de vorm van voorspellingen over de uitkomsten van nog te verrichten experimenten. Deze voorspellingen werden wel door de experimenten bevestigd. Als resultaat van de toetsing kon je toen zeggen: deze hypothese is (nog) niet gefalsificeerd.

Voor een goed begrip van de waarde van een hypothese is het van belang in te zien dat beslist niet bewezen is dat de hypothese in ons voorbeeld waar is of juist is. Sterker nog: het is onmogelijk te bewijzen dat een hypothese waar is of juist is. Dan zou je immers alle consequenties die uit een hypothese kunnen worden afgeleid, zonder enige uitzondering moeten toetsen. Uit ons simpele voorbeeld blijkt al dat het onmogelijk is dat de jongen alle houten voorwerpen op hun brandbaarheid gaat onderzoeken.

Men kan dus bij een natuurwetenschappelijke hypothese meestal slechts een deel van de consequenties toetsen. Als geen van die consequenties strijdig blijkt te zijn met de resultaten die bij toetsing worden gevonden zegt men dat de hypothese **geconfirmeeerd** (= bevestigd) is.

Aan de hypothese kan nu een zekere waarde worden toegekend, de hypothese is **bruikbaar** gebleken. Zij is **waarschijnlijk**. Het blijft echter mogelijk dat in de toekomst door iemand een experiment wordt verricht, dat tot falsificatie van de hypothese leidt, met als gevolg dat de hypothese moet worden bijgesteld of verfijnd of zelfs door een geheel andere worden vervangen.

12.4 Falsificatie

Volgens de wetenschapsfilosoof Popper (1902 - 1994) moet het toetsen van een hypothese zich richten op de falsificatie van de hypothese. Hij ontdekte dat toen hij enige tijd als vrijwilliger meedraaide in de kliniek voor moeilijk opvoedbare kinderen van de bekende psycholoog Alfred Adler. Het viel hem op dat Adler de problemen van deze kinderen altijd op dezelfde manier verklaarde, namelijk vanuit een minderwaardigheidscomplex. Als

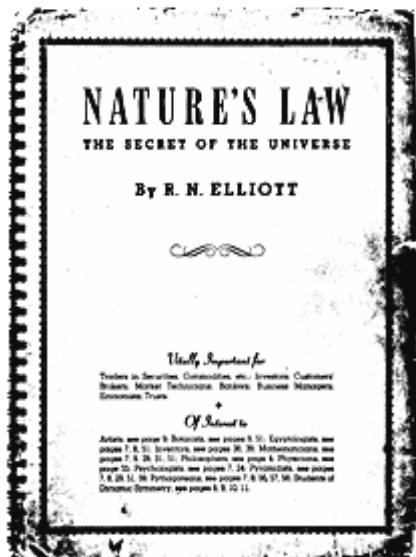
bepaalde waarnemingen er niet mee leken te kloppen wist hij altijd wel een argument te verzinnen om het toch klopend te maken.

Daardoor leek het of zijn theorie steeds weer bevestigd werd en dus steeds sterker kwam te staan. Elke waarneming leek de theorie te bevestigen, maar dat was juist het zwakke punt ervan. Er was immers geen enkele waarneming denkbaar die niet als confirmerend kon worden uitgelegd.

Volgens Popper moet de wetenschap uitspraken doen zoals: ‘Als dit experiment wordt uitgevoerd en zo’n resultaat geeft kan mijn theorie niet juist zijn.’

Hij haalde daarbij als voorbeeld van goede wetenschap aan de voorspelling van Albert Einstein over de afbuiging van licht door hele zware hemellichamen (zie paragraaf 11.1). Door deze bevestiging kwam de relativiteitstheorie van Einstein veel sterker te staan. Juist de kwetsbaarheid van zijn theorie was zijn grote kracht.

Volgens Popper moet wetenschap zoeken naar riskante experimenten, naar ‘cruciale tests’, die de theorie onderuit kunnen halen in plaats van naar waarnemingen, die haar bevestigen.



Figuur 52

Opgave 73

Noem nog twee cruciale tests uit de ontwikkeling van het oerknalmodel.

12.5 Natuurwetten

Als de hypothese vaak genoeg geconfermeerd is wordt de hypothese een wet, een natuurwet.

Een natuurwet kun je zien als een door de mens geformuleerde regelmatigheid in de schepping.

We moeten natuurwetten wel onderscheiden van de wetten van een land, bijvoorbeeld in het strafrecht.

Zo'n wet schrijft iets voor: zo moet het. En als de onderdanen perfect gehoorzamen, gebeurt het ook zo en wel altijd. Dat is niet het geval bij een natuurwet.

We zouden misschien beter van 'gewoonte' kunnen spreken. Een natuurwet is altijd mensenwerk. Hij kan

dus onjuist blijken te zijn of beperkt geldig. Stenen, die je van een bepaalde hoogte loslaat vallen naar de grond. Dat is een natuurwet. Als iemand een steen spontaan heeft zien opstijgen, en hij kan die ervaring niet op afroep herhalen, dan is dat een 'feit', waar de natuurwetenschap niets mee kan. We hebben echter niet het recht om tegen hem te zeggen: "U vergist zich, want het kan helemaal niet".

12.6 Theorie

Een theorie legt een verband tussen verschillende wetten. Voorbeeld: de atoomtheorie. Vrijwel elke theorie in de natuurwetenschap berust op vele hypothesen, die alleen maar geconfermeerd zijn. Daarom kan een theorie ook alleen maar geconfermeerd worden. Men kan nooit bewijzen dat een theorie juist is, absoluut waar is. Men kan hoogstens zeggen dat hij bruikbaar of waarschijnlijk is, namelijk als de theorie door de experimenten wordt bevestigd.

12.7 De empirische cyclus

Na de toetsing vindt als laatste fase van het empirisch wetenschappelijk onderzoek de evaluatie plaats.

De resultaten van de toetsing worden geëvalueerd, werpen meestal nieuwe vragen op en leveren suggesties voor nieuwe experimenten. Men spreekt daarom wel van een empirische cyclus, die bestaat uit vijf fasen, namelijk waarneming, inductie, deductie, toetsing en evaluatie, waarna een nieuwe reeks waarnemingen volgt (het woord '*empirisch*' wil zeggen: steunend op waarnemingen).

Het kan uit het voorgaande duidelijk zijn dat in de natuurwetenschappen hypothesen vaak worden herzien en door andere vervangen. Daarom zullen ook theorieën vaak worden verfijnd, herzien en door betere (beter bruikbare) vervangen. Op deze manier groeit de menselijke kennis van de natuur en komt de natuurwetenschap stap voor stap verder. Een natuurwetenschapper is te vergelijken met een kabouter die op de schouder van zijn voor-gangers zittend iets meer probeert te onderscheiden van het grote donkere bos vóór hem.

Overigens moeten we wel beseffen dat de hiervoor beschreven werkwijze niet voor alle takken van de natuurwetenschapsbeoefening een compleet beeld geeft van de werkelijke gang van zaken.

In bijvoorbeeld de biologie, maar meer nog in de astronomie, de meteorologie en de geologie verkrijgt men ook heel wat kennis uit waarnemingen die niet reproduceerbaar zijn. Men heeft in deze takken van de natuurwetenschap ook te maken met gebeurtenissen die eenmalig zijn en die niet door experimenten kunnen worden geverifieerd. Het moderne onderzoek naar elementaire deeltjes wordt uitgevoerd door teams van wetenschappers. Zij gebruiken zeer kostbare en ingewikkelde apparatuur. Zo is 6 miljard euro uitgegeven aan de LHC (Large Hadron Collider), de grootste en krachtigste deeltjesversneller van de wereld voor onderzoek naar de bouwstenen van de bouwstenen van de materie. Het is duidelijk dat dit soort onderzoek vanwege de astronomische kosten ook bijna niet door anderen kan worden herhaald.

Opgave 74

Noem nog twee axioma's uit de wiskunde.



Figuur 53: Voorloper van natuurwetenschapper? De astroloog.

Opgave 75

Licht het verschil tussen feit en theorie met enkele voorbeelden toe.

Opgave 76

Geef je commentaar op de volgende uitspraak: ‘Vanuit natuurwetenschappelijk onderzoek (geleidbaarheids-proeven) weten we zeker dat keukenzout is opgebouwd uit ionen en suiker uit moleculen’.

Opgave 77

Zijn de volgende uitspraken bewijsbaar? Licht je antwoord toe.

- a. Koper smelt bij 1356 K
- b. Metaal zet uit bij temperatuurverhoging
- c. Alle leerlingen van onze school kunnen zwemmen.

12.8 Objectief en onbevooroordeeld? Het positivisme

Vele natuurwetenschappers beweren dat beoefening van de natuurwetenschap een neutrale aangelegenheid is. Volkomen *objectief en onbevooroordeeld* zou een natuurwetenschapper experimenteren verrichten. Door goede waarnemingen zou hij tot reproduceerbare feiten komen. De verkregen feiten zouden daarom volstrekt onafhankelijk zijn van de religieuze, politieke of culturele achtergrond van de onderzoeker.

Vanuit de feiten zou men vervolgens via hypothesen tot algemeen geldende uitspraken komen. Die werkwijze zou inhouden dat het hele proces van kennisverwerving zich afspeelt in een zuiver neutrale sfeer. Deze gedachtegang stamt vooral uit de wijsgerige stroming van het 'positivisme'.

Het *positivisme* beweert dat de natuurwetenschap zich alleen bezig houdt met de 'faits positifs'. Dat zijn de pure, objectieve feiten, zoals ze zich voordoen in de werkelijkheid. Zonder enige inbreng van buiten.

Bij deze gangbare mening over de natuurwetenschap zijn kritische opmerkingen te plaatsen. Die gaan over:

De persoon van de onderzoeker

Abstraheren

Paradigma

Selectie

Creatief denkwerk

Experimentele toetsbaarheid

12.9 De persoon van de onderzoeker

De gedachte, dat het startpunt van een natuurwetenschappelijk onderzoek ligt bij de experimenten en waarnemingen, ziet een belangrijk gegeven over het hoofd. Het natuurwetenschappelijk onderzoek staat namelijk niet los van de persoon van de onderzoeker. Het startpunt ligt niet bij de empirische feiten, maar bij de onderzoeker. Deze neemt in zijn onderzoek, bewust of onbewust, altijd zijn eigen *achtergrond*, zijn eigen *levens- en wereldbeschouwing*, zijn visie mee.

De werkelijkheid komt in een overweldigende veelzijdigheid op hem af. Hij moet beginnen met *selecteren*. Het *maken van keuzen*. Dat geldt voor de keuze van het onderzoeksprogramma. Maar ook voor de keuze van de experimenten die hij gaat opzetten.

Het onderzoek begint vaak met verwondering bij de natuurwetenschapper. Hoe is een bepaald facet van de natuur te verklaren?

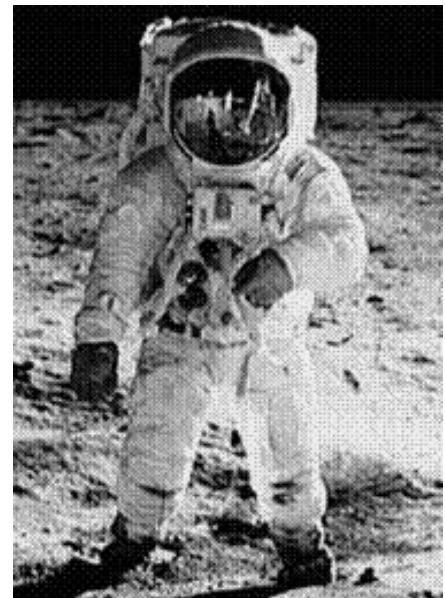
Soms is iets wat hij waarneemt in strijd met wat hij op grond van een bepaalde theorie verwacht. Theorieën spelen daarom een belangrijke rol bij de keuze van de experimenten. Voorbeelden van het bovenstaande zijn:

- Het onderzoek naar het voorkomen van levende organismen op de planeet Mars. Vrijwel alles was hier gericht op het willen bewijzen van de hypothese "er is leven op Mars". De objectiviteit was hier ver te zoeken.
- Onderzoek in het kader van evolutietheorieën. Er is zeer veel onderzoek verricht dat de bedoeling had de evolutie te bewijzen.

Het is meestal niet de individuele onderzoeker die kiest. Hij moet immers in een team werken. De hoofdrichting van het onderzoek wordt bepaald door de instelling die het onderzoek finanziert.

Zo is er door de regering van Amerika heel veel geld uitgegeven om in 1969 de eerste mens op de maan te krijgen. Dit succes van wetenschap en techniek oogstte wereldwijd bewondering. Je kunt die gebeurtenis ook bekijken door de ogen van de filosoof *Paul Feyerabend*. Die ziet het zo: "*Wat uit technologisch standpunt een fantastische prestatie lijkt, een bemande ruimtevlucht naar de maan, ziet er vanuit een ander gezichtspunt uit als een volmaakte dwaasheid: duizenden hooggekwalificeerde mensen zijn tientallen jaren intensief bezig om ten koste van veel inspanning en enorme sommen geld een relatief klein aantal (twee) van hen, uitgedost in carnavalspakken, een paar potsierlijke danspasjes te laten uitvoeren op een droge, hete, atmosfeerloze kei, waar niemand, die bij zijn volle verstand is, naar toe zou willen.*"

In de vorige eeuw is nog een ander verband ontdekt tussen de onderzoeker en het experiment dat hij doet. In de *quantummechanica* is er geen sprake meer van een 'objectieve werkelijkheid' buiten de onderzoeker, die hij rustig kan gaan bekijken. Het waarnemen zelf heeft namelijk invloed op de afloop van het experiment. Zo kun je eigenlijk niet meer van een werkelijkheid spreken los van de onderzoeker. De waarnemer en het waargenomene zijn onlosmakelijk verbonden.



Figuur 54: mens op de maan, een toppunt van wetenschap en technologie

Opgave 78

Er wordt wereldwijd zo'n 84 miljoen dollar uitgegeven aan onderzoek naar malaria, tegenover 800 miljoen aan astma-onderzoek.

- a. Leg uit waarom dat zo is.
- b. Wat is jouw mening hierover?

Opgave 79

Een onderzoek naar een gen voor criminaliteit is jarenlang tegengehouden. Leg uit waarom.

Opgave 80

Noem nog een voorbeeld van genetisch onderzoek dat waarschijnlijk niet zal worden toegestaan.

12.10 Abstraheren.

Bij natuurwetenschappelijk onderzoek is er sprake van abstraheren (zelfstandig naamwoord: *abstractie*). Abstraheren betekent: losmaken van de aanschouwing, in gedachten afzonderen. Abstract staat tegenover *concreet*. Concreet is zoals het zich aan ons voor-doet.

De natuurwetenschapper start zijn onderzoek bij de concrete zintuiglijk waarneembare werkelijkheid. Het uitvoeren van experimenten is een concrete aangelegenheid.

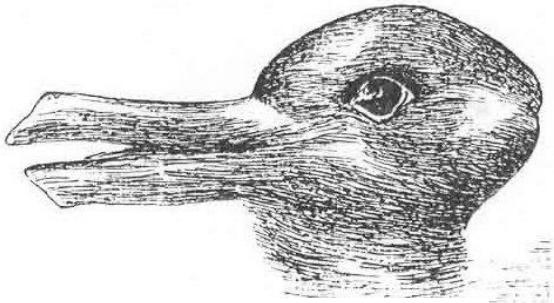
De eerste *abstractie* vindt echter plaats bij het waarnemen. Wij kunnen met onze zintuigen geen totaalbeeld krijgen. Zo is bijvoorbeeld de zintuiglijk waarneembare mens een abstractie van de totale mens. Je kunt bij een mens een heleboel dingen zien, horen, meten, wegen en tellen. Maar wat er aan gedachten in een mens omgaat kun je niet met je zintuigen waarnemen.

Bovendien gaat het bij het waarnemen altijd om de aspecten die je *relevant* vindt. Zo is bij het noteren van een meterstand de kleur van de wijzer onbelangrijk, niet relevant. Je beschrijft dus niet alles, maar je zondert bepaalde dingen af van de rest.

Maar wie bepaalt wat relevant is? Dat is steeds de natuurwetenschapper zelf. Alle 'feiten' die serieus genomen worden zijn daarom '*theorie-geladen*'.

Prof. dr. A. van den Beukel vergelijkt wetenschappers met een stroper die 's avonds het bos in gaat. Hij heeft een lichtbak voor zijn buik en het geweer in de aanslag. Zijn doel is konijnen schieten. Die lichtbak is zijn theorie, zijn zoeklicht. De enige feiten die voor hem relevant zijn, zijn de konijnen die hij in zijn lichtbundel vangt. Als je hem zou vragen 'de werkelijkheid' van het bos te beschrijven, zou hij zeggen: "*Een bos is een terrein waar je konijnen kunt afschieten als je een goede lichtbak en een goed geweer hebt, en behoorlijk schieten kunt*". Al het andere dat daar ook te zien en te beleven is, ziet hij niet, want hij wenst het te negeren. Als je in datzelfde bos een vogelkenner, een dichter of een verliefd paartje loslaat, zul je heel andere verhalen kunnen horen over wat er in dat bos te beleven valt.

Een tweede voorbeeld gaat over de Deense astronoom *Tycho Brahe* en zijn assistent *Johannes Kepler*. Zij zagen twee verschillende dingen bij het waarnemen van een zonsondergang. De geocentrist Tycho zag de zon opkomen boven een stilstaande horizon. De heliocentrist Kepler zag de horizon wegdraaien onder een stilstaande zon.



Figuur 55 Wat verwacht je te zien?

Een vierde voorbeeld komt van de antropoloog Margaret Mead. Zij haalde eens een inboorling uit Zuidoost Azië naar Singapore en leidde hem rond door deze hoogontwikkelde stad. Toen ze hem na afloop vroeg wat hij gezien had, antwoordde de man, dat hij *niets* gezien had. Na enig aandringen gaf hij toe dat dat niet helemaal juist was: hij had iemand voorbij zien komen met bananen en zich daarbij verbaasd over de grote hoeveelheid bananen die verplaatst werd. De reactie van de inboorling lijkt vreemd, maar is het niet. Door zijn verleden in de bossen kon hij de dingen niet thuis brengen. Alleen een met bananen geladen vrachtwagen kwam hem ergens bekend voor. Voor de rest kon hij geen structuur aanbrengen in wat hij zag. Hij had geen verwachtingspatroon opgebouwd.

Natuurwetenschap beperkt zich tot de feiten die relevant zijn in het (zoek)licht van de heersende theorie. Dat is prima. Het is haar plicht om dat te doen. Bij die leest moet de schoenmaker zich houden. Maar dan moet je niet de fout maken om te verkondigen dat deze zogenaamde ‘harde’ feiten de enige soort kennis vormen die de moeite van het kennen waard is.

Casimir vergelijkt wetenschappers die zich zo gedragen met een timmerman die hij gekend heeft. Als die ‘s avonds in beschonken toestand thuis kwam sprak hij zijn vrouw aldus toe: “*Dit huis is gemaakt door een timmerman. De stad is gemaakt door timmerlui. De hele wereld is gemaakt door timmerlui. Ik ben een timmerman; kniel voor mij neer!*”

Wat de wetenschapper relevant vindt zal vooral worden bepaald door allerlei vermoedens, veronderstellingen of hypothesen die al van tevoren in zijn brein aanwezig zijn. Welke dat zijn wordt onder meer bepaald door zijn religieuze, politieke en culturele achtergrond. Verder is van belang in welk vakgebied hij thuis is. En welk onderzoek hij eerder heeft uitgevoerd.

Een derde voorbeeld is het plaatje hiernaast. De eend, die ook als een haas of konijn kan worden waargenomen. Je ziet onmiddellijk het één of het ander. Hoe komt het dat de één een eend ziet en de ander een konijn? Dat hangt samen met wat je verwacht te zien. Zegt iemand bijvoorbeeld: “*Zie je die eend daar?*” dan zul je inderdaad een eend zien en geen konijn. Zie ook het plaatje hierna.



Figuur 56: Het is maar hoe je het bekijkt..

12.11 Paradigma

Dit geldt niet alleen voor de individuele onderzoeker, maar ook voor een groep onderzoekers. Zelfs voor *alle onderzoekers op een vakgebied*. Alle leden van die gemeenschap vormen een kring van ingewijden. Zij werken vanuit een bepaald *paradigma*. Met *paradigma* bedoelen we *het geheel van opvattingen, waarden, meningen en technieken die gedeeld worden door de leden van een wetenschappelijke gemeenschap*. De term ‘paradigma’ komt van de wetenschapsfilosoof *Thomas Kuhn* (1922-1996). De natuurkundigen van de 19e eeuw hadden de mechanica van Newton als *paradigma*. In de 20e eeuw werd dit vervangen door het *paradigma van de quantum-mechanica* en de *relativiteitstheorie*. In de biologie wordt het *paradigma van het neodarwinisme* gehanteerd.

Het *paradigma van het statische heelal* werd in ongeveer 60 jaar vervangen door dat van de oerknal.

De wetenschap bekijkt onderzoek dat het heersende *paradigma* ter discussie stelt, zeer wantrouwend. Als dat onderzoek al gefinancierd en gepubliceerd kan worden.

Opdracht 81

Zoek uit wat de volgende termen uit de paradigmatheorie betekenen:

- a. anomalieën
- b. crisis
- c. ad hoc hypothesen
- d. paradigmawisseling

Opgave 82

Een *paradigma* kan negatief en positief werken. Leg beide uit.

12.12 Selectie

Het aantal waarnemingen is vaak zo enorm groot dat er een *selectie* plaats moet vinden. Denk aan de gigantische hoeveelheid gegevens, die satellieten naar de aarde sturen. Bij de redactie van een krant speelt hetzelfde probleem. Daar komen zo veel nieuwsfeiten binnen, dat slechts een zeer klein deel in de krant kan komen. Zo'n *selectie* is natuurlijk subjectief.

Een extra moeilijkheid geven statistische processen. Dan is er een extra beoordeling nodig. Is een hypothese bevestigd als hij in 92% van de experimenten wordt bevestigd?

Uit deze opmerkingen blijkt dat *natuurwetenschappelijke feiten in veel gevallen aanzienlijk minder objectief zijn dan vele natuurwetenschappers beweren*.

Opgave 83

G.N. Lewis heeft gezegd: "Het was wetenschappelijke arrogantie die een wet van de natuurkunde een wet van de natuur noemde"

Wat vind je van deze uitspraak?

Opgave 84

- Wat is positivisme?
- Wat is het gevaarlijke ervan?

12.13 Creatief denkwerk

Experimenten en waarnemingen leveren hypothesen. Dat proces kan evenmin volkomen objectief en onbevooroordeeld zijn. Immers, de hypothese komt tot stand door creatief denkwerk van de onderzoeker. De één krijgt zijn ideeën terwijl hij in de kerk zit, de ander in de kroeg of terwijl hij thuis voor de open haard zit te dommelen.

Als je over wetenschappelijk onderzoek leest kom je dan ook vaak zinnen tegen als:

“Plotseling schoot het door me heen...”, “Er viel me een gedachte in...”, “Alle puzzelstukjes vielen op hun plaats...”

Menselijk denkwerk is beperkt en gebrekkig. Het is daarom onmogelijk dat een mens volkomen objectief en onbevooroordeeld hypothesen formuleert op basis van feiten.

12.14 Alleen experimenteel toetsbare grootheden

We moeten bedenken dat de natuurwetenschappelijke methode ook zijn beperkingen heeft. De methode houdt in dat men zich concentreert op wat *experimenteel toetsbaar* is. Bij het opstellen van hypothesen geldt de eis dat je experimenteel toetsbare consequenties moeten kunnen afleiden. Het gevaar bestaat dat ter wille daarvan belangrijke aspecten buiten beschouwing blijven.

In de meteorologie, maar ook in de geologie en de astronomie worden veel metingen uitgevoerd en waarnemingen verricht, zonder dat er van experimenteren sprake is. In veel gevallen zijn deze waarnemingen niet experimenteel toetsbaar. Het weer is nu eenmaal geen dag hetzelfde en met de komeet van Halley, die eens in de 76 jaar in de buurt van de aarde komt kun je ook niet allerlei proeven doen.



Figuur 57: Oudste afbeelding van de komeet van Halley (11e eeuw). Koning Harold klaagt over zijn ongeluksster

Het is niet denkbeeldig dat de eis van empirische toetsbaarheid leidt tot versimpeling of zelfs vertekening van de realiteit. Is de experimentele methode altijd wel in staat om volledig recht te doen aan wat je onderzoekt?

Hier ligt het gevaar van het *reductionisme* op de loer. Reduceren betekent terugbrengen. Je reduceert wat je onderzoekt tot een bepaald aspect. Dat aspect onderzoek je door en door. Daarna denk je dat het geheel hebt begrepen. Dan krijg je reductionistische uitspraken zoals: *“De mens is niets anders dan een machine”*, *“Een kind in de moederschoot is niets anders dan een klompje slijm”*, *“Liefde is niets anders dan seks”*. *“Dokters zien het hart als een pomp”*.

Bij het onderzoek van de natuur denken sommigen alles te kunnen verklaren door naar de kleinste bouwsteenjes (moleculen, atomen, quarks) te kijken.

Gerard 't Hooft, een Nederlandse Nobelprijswinnaar, zei: "Als we nu al die deeltjes met alle daarop werkende krachten bij elkaar nemen, zullen we het geheel ook begrijpen". Het belachelijke hiervan is aan te tonen door de volgende analogie. Volgens de verstokte reductionist houdt de meest fundamentele studie

van Shakespeare uitsluitend in: de studie van het Engelse alfabet. De rest is eigenlijk voortbouwen op een paar bekende standaardprocedures.

Laat een natuurwetenschapper kijken naar een schilderij. Hij kan je dan van alles vertellen over de scheikundige samenstelling van de gebruikte verfsoorten, de weerkaatsing en absorptie van verschillende frequenties uit het opvallende licht enz. Dan weet je echter nog niets van de *betekenis* van zo'n schilderij.

Vele positivisten menen dat via de natuurwetenschappelijke methode de werkelijkheid volledig te kennen is. Prof. Schuurman spreekt in dit verband van een *wetenschapsgeloof*. Het heeft de pretentie de werkelijkheid volledig in haar greep te kunnen krijgen. Dit wetenschapsgeloof is een uiting van de mens die volstrekt zelfstandig en *eigenmachtig* (*autonom*) wil zijn.

Casimir, één van de belangrijkste natuurkundigen van de 20^e eeuw, zei: "We hebben de wetenschap tot onze God verheven". Hij merkt ook op: "Natuurkundige theorieën zijn een benaderende beschrijving van een beperkt gedeelte van de fysische verschijnselen, die op hun beurt slechts een beperkt gedeelte van onze menselijke ervaringen uitmaken".

Een christen weet dat hij vanuit de natuurwetenschap geen volledige greep op de werkelijkheid kan krijgen. Het geschapene is een ondoorgrondelijk geheim en ten diepste niet te kennen (vergelijk b.v. Prediker 7: 23 en 24). Belangrijke kennis over de oorsprong en de zin van de natuur, over de gevolgen van de zonde voor de natuur en over het perspectief, waarin we de natuur moeten zien, krijgen wij uit de Bijbel. Deze kennis kunnen we onmogelijk krijgen door middel van beoefening van de natuurwetenschap.

Opgave 85

a. Wat is reductionisme?

b Bedenk zelf nog een voorbeeld van reductionisme.

Opgave 86

De filosoof Nietzsche schreef ruim honderd jaar geleden onderstaand citaat. Geef je commentaar.

Hebt ge niet gehoord van die dwaas die op klaarlichte morgen een lantaarn opstak, de markt op ging en onophoudelijk riep: 'Ik zoek God! Ik zoek God'. Omdat er daar juist veel van die lieden bijeen waren die niet in God geloofden, verwekte dit een



Figuur 58: schilderij

groot gelach. (...) De dwaas sprong midden tussen hen in, en doorboorde hen met zijn blikken. ‘Waar God heen is?’, riep hij uit. ‘Dat zal ik jullie zeggen! Wij hebben Hem gedood - jullie en ik! Wij allen zijn moordenaars!. (...) Maar wat hebben wij gedaan toen we deze aarde van haar zon loskoppelden? In welke richting bewegen wij ons? Weg van alle zonnen? Vallen wij niet aan één stuk door? (...) Dolen wij niet als door een oneindig niets? Ademt ons niet de lege ruimte in het gezicht? Is het niet kouder geworden?’

Opdracht 87

In de map ‘Achtergrondinformatie’ staat een interview van het Nederlands Dagblad met de sterrenkundige Peter Barthel en een toespraak van de sterrenkundige Marco de Vos. Zij vertellen een persoonlijk verhaal over hun geloof in verband met hun werk als sterrenkundige.

Lees deze verhalen.

Maak van beide verhalen een samenvatting van in totaal ongeveer 1 A4.

Geef in ongeveer ½ A4 jouw mening over deze twee verhalen.

SMS van Tom op vrijdagavond 21 oktober.

Ha Ma. Weet nu studie. Geologie biologie sterrenkunde veel te beperkt. Ga natuurwetenschappen doen en daarna wetenschapsfilosofie. Tot morgen.
Tom.

Eindopdrachten

1 Fossielen uit de Noordzee

Vissen op schol of bot op de bodem van de Noordzee levert de vissers in de netten vaak meer op dan vis. Er blijven met grote regelmaat grote botten in de netten hangen. Op veel vissersboten worden de fossiele botten in kratten bewaard en aan land gebracht. De wetenschappelijke wereld is er blij mee. Fossielen van de Noordzeebodem bieden een fraaie kijk op het verleden van Nederland. Uit de zandige zeebodem zijn talloze botten van mammoeten, paarden, sabeltandtijgers, runderen, reuzenherten en nog veel meer dieren zijn botten opgevist. De zeebodem was ooit een grazige grasvlakte. De zeespiegel is sinds de Steentijd tientallen meters gestegen, waardoor de restanten van het toenmalige leven van dieren en mensen onder water verdwenen zijn.

Lees het interview met Kommer Tanis, Noordzeevisser en botterverzamelaar (ND, 16 oktober 2010).

Naturalis heeft een grote verzameling fossielen uit de Noordzee. Kijk op www.naturalis.nl. Een prachtig boek over de pleistocene fauna is: Een kleine encyclopedie van het leven in het Pleistoceen, Mammoeten, neuwshoorns en andere dieren van de Noordzeebodem. Dick Mol, e.a. (Natuurwetenschap en Techniek, Veen Magazines, Diemen 2008).

Vragen

Wat is een IJstijd? En hoe ontstaat die? Zijn hier tegenstrijdige verklaringen voor? Welke sporen zijn in Nederland terug te vinden van de IJstijden?

Wat vertelt de aanwezigheid van restanten van landzoogdieren over de zeespiegel in het verleden? Hoe is vastgesteld hoe hoog de zeespiegel in het verleden stond?

Zoek een grafiek waarin de hoogte van de zeespiegel is weergegeven vanaf het Pleistoceen.

Hoe zag het ecosysteem van de Rijndelta er in de Steentijd uit?

Hoe bepaalt men de ouderdom van fossielen van de zeebodem?

Verzamel gegevens over het Pleistoceen, en maak duidelijk door welke oorzaken men denkt dat de dieren uit deze periode verdwenen zijn. Hoe wordt de ouderdom van deze vondsten bepaald? Waar kunnen deze vondsten bekeken worden?

Verwerking

Mogelijkheid 1: Maak een schriftelijk verslag met je bevindingen. Zorg dat het een leesbaar verhaal wordt, met een maximale omvang van 15 pagina's tekst en illustraties.

Mogelijkheid 2: Verzorg een mondelinge presentatie, die ondersteund wordt met beelden. Maximale tijdsduur: 20 minuten. Lever ook een goede handout van je presentatie.

Mogelijkheid 3: Maak een film. Hiervoor kun je een bezoek brengen aan een museum waar Pleistocene fossielen te vinden zijn, of een bezoek brengen bij een fossielenverzamelaar of paleontoloog. Ga na hoe men achterhaalt van welke diersoort gevonden botten zijn, hoe de reconstructie gedaan is en hoe men denkt dat deze dieren geleefd hebben en waardoor ze uitgestorven zijn.

2 Oorsprong van de mens

Over de oorsprong van de mensheid wordt veel onderzoek gedaan, en veel gespeculeerd. Welke theorieën zijn er over de oorsprong van de mens? Is het bewijsmateriaal rond evolutie van de mens overtuigend? Zijn er andere verklaringen? Wanneer is de soort mens (*Homo sapiens*) volgens wetenschappers ontstaan? Welke verklaring overtuigt jou het meest?

Welke fossiele bewijzen zijn er over de menselijke historie? Op welke manier wordt onderscheid gemaakt tussen apen en mensen? Hoe wordt genetisch onderzoek ingezet om de historie van de mens te reconstrueren? Hoe lang bestaat de mensheid volgens dergelijk onderzoek. Wijst het bewijs dezelfde kant op, of zijn er grote verschillen?

Welke reconstructies zijn er gemaakt? Hoe zijn die in de loop der tijd veranderd?

Is, volgens jou, het bewijsmateriaal rond de oorsprong van de mens voldoende voor de verklaring die gegeven wordt?

Verwerking

Mogelijkheid 1: Maak een schriftelijk verslag met je bevindingen. Zorg dat het een leesbaar verhaal wordt, met een maximale omvang van 15 pagina's tekst en illustraties.

Mogelijkheid 2: Verzorg een mondelinge presentatie, die ondersteund wordt met beelden. Maximale tijdsduur: 20 minuten. Lever ook een goede handout van je presentatie.

Mogelijkheid 3: Maak een poster. Geef hierin antwoord op de vragen, maak een overzicht van de bewijzen die er zijn. Zet de verklaringen naast elkaar.

3 Curiosity

Op maandag 6 augustus 2012 is Curiosity op Mars geland. Dit is niet het eerste ruimtevoertuig dat onderzoek gaat doen op Mars. In de jaren zeventig van de vorige eeuw waren er al de Vikings. In de tussentijd hebben er allerlei andere landingen plaats gevonden. Een karretje dat nog steeds rond rijdt is Opportunity (vanaf 2004)

Wat is het doel van Curiosity (en ook van zijn voorgangers)? Welke analysemethodes gebruikt de Curiosity? Vertel iets over reeds bekende resultaten over Mars? Ook van Curiosity.

Er wordt momenteel ook veel onderzoek gedaan naar zogenaamde exoplaneten? Hoe? En wat zijn de resultaten tot nu toe? Vertel in je verhaal ook iets over de vergelijking van Drake.

4 Epigenetica

Waar genetica de studie is naar erfelijke informatie in de nucleotidenvolgorde in het DNA, is epigenetica de studie van overerfbare veranderingen aan het DNA die niet in de nucleotidenvolgorde zijn terug te vinden. Epigenetische veranderingen bestaan in twee vormen: 1. aanpassingen aan het DNA zelf of 2. aanpassingen aan de histoneiwitten, waar

de dubbele helix omheen gewikkeld zit. Beide typen veranderingen hebben invloed op de mate van genexpressie, doordat ze het DNA meer of juist minder toegankelijk te maken voor transcriptiefactoren. Bijvoorbeeld:

Aan de nucleotide cytosine (C) kan een methylgroep (-CH₃) toegevoegd zijn. We noemen die nucleotide dan gemethyleerd. Als de promotor van een gen gemethyleerd is, is transcriptie niet mogelijk.

Doordat de epigenetische aanpassingen bij DNA-replicatie ook aan de nieuwe DNA-streng worden toegevoegd, zijn ze overerbaar. Ze spelen daardoor ook een belangrijke rol bij de celspecialisatie (zie ook <http://www.allesoverdna.nl/woordenboek/epigenetica.html>).

Zoek informatie over de mogelijke epigenetische veranderingen. Maak van je literatuurstudie een verslag.

5 Een heelal zonder oerkenal

De Nederlandse fysicus Erik Verlinde verdedigt een nieuwe opvatting over de zwaartekracht.

Daarmee wil hij een nieuwe fysica ontwikkelen. Een natuurkunde zonder oerkenal, waarin donkere materie en donkere energie eindelijk begrepen zijn.

Opdrachten

Vergelijk drie modellen van de zwaartekracht met elkaar:

de theorie van Newton

de relativistische opvatting van Einstein

het model van Verlinde

Leg uit waarom de zwaartekrachtstheorie van Verlinde een model van het heelal zonder oerkenal mogelijk maakt.

Leg uit hoe Verlinde denkt over donkere materie en donkere energie.

Wat zou een cruciale test zijn voor de theorie van Verlinde?

Ga na hoe de theorie van Verlinde is ontvangen in de wetenschappelijke wereld. Betrek hierbij wat je hebt geleerd in het hoofdstuk over wetenschap.

bron: Hal, George van, *Een heelal zonder oerkenal*, nwtmagazine, januari 2012.

Aanwijzingen:

- 1 je logboek goed bijhouden; lees de instructie nog eens goed!
- 2 je gebruikt lettertype Arial 11 pts, met normale marge en regelafstand 1
- 3 het aantal kantjes A4 dat bij de presentatievorm ‘artikel’ of ‘verslag’ vermeld staat, is altijd **exclusief** het titelblad en de plaatjes!
- 4 inleverdatum:
- 5 presentatievorm: verslag (maximaal 3 A4).
- 6 groepsgrootte: 2 personen
- 7 studielast: 5 slu

6 The Square Kilometre Array

SKA wordt de grootste en krachtigste radiotelescoop ter wereld.

Het wordt een stelsel van meer dan 250 stations, verspreid over duizenden kilometers.

Als je de gegevens, die SKA in 1 dag binnenen zal krijgen zou willen afspelen op je ipod dan zou je dat 2 miljoen jaar kosten.

Opdrachten

Vergelijk radiotelescopen met telescopen voor andere golflengten.

Noem voor- en nadelen

Wat zijn de plannen voor SKA? Denk aan:

Welke landen werken samen?

Plaats en tijdplanning van de bouw

Kosten

De plaats van de verschillende stations

Zet de prestaties van SKA af tegen die van andere radiotelescopen

Hoe combineert men de gegevens tot een totaalplaatje?

Welk onderzoek gaat men ermee doen?

Welke uitkomsten van het onderzoek worden verwacht?

Verwerk de uitkomsten van je onderzoek in een verslag en gebruik ze voor het maken van een poster.

Deze poster wordt gebruikt om de Ministeries van Wetenschap van de verschillende landen ervan te overtuigen om geld vrij te maken voor SKA.

Gebruik zo weinig mogelijk tekst. Reclame mag, misleiding niet.

bron: www.skatelescope.org

Aanwijzingen:

- 1 je logboek goed bijhouden; lees de instructie nog eens goed!
- 2 je gebruikt lettertype Arial 11 pts, met normale marge en regelafstand 1
- 3 het aantal kantjes A4 dat bij de presentatievorm ‘artikel’ of ‘verslag’ vermeld staat, is altijd **exclusief** het titelblad en de plaatjes!
- 4 inleverdatum:
- 5 presentatievorm: verslag (maximaal 3 A4) of poster (formaat A2).
- 6 groepsgrootte: 2 personen
- 7 studielast: 5 slu

7 De wetenschappelijke methode in geologie, biologie en astronomie

De wetenschappelijke methode gaat uit van experimenten en waarnemingen om hypothesen te toetsen.

Het lastige is dat juist in de geologie, de biologie en de astronomie het heel vaak niet mogelijk is om zelf een experiment op touw te zetten.

De evolutie is vooral een historisch proces. De vorming van aardlagen in extreme situaties kun je niet in het laboratorium nadoen en in de kosmologie ben je ook afhankelijk van wat er aan straling vanuit het heelal naar je toekomt.

Daarmee hangt samen, dat de ‘theorie-geladenheid’ van je waarnemingen groot zal zijn.

Opdrachten

Is het zo, dat de wetenschappelijke methode dus helemaal niet gebruikt kan worden in de drie genoemde wetenschappen? Geef voorbeelden.

Wat heeft de wetenschapsfilosoof Kuhn hierover te zeggen? Betrek hierin ook de ‘stelling van Duhem en Quine’.

Geef ook de mening van Lakatos.

bron: Brink, Gijsbert van den, *Een publieke zaak, Theologie tussen geloof en wetenschap*. Zoetermeer, 2004.

Aanwijzingen:

- 1 je logboek goed bijhouden; lees de instructie nog eens goed!
- 2 je gebruikt lettertype Arial 11 pts, met normale marge en regelafstand 1
- 3 het aantal kantjes A4 dat bij de presentatievorm ‘artikel’ of ‘verslag’ vermeld staat, is altijd **exclusief** het titelblad en de plaatjes!
- 4 inleverdatum:
- 5 presentatievorm: verslag (maximaal 5 A4).
- 6 groepsgrootte: 2 personen
- 7 studielast: 5 slu

8 Vitamine C

René Fransen schrijft in zijn boek *Gevormd uit Sterrenstof* (Uitgeverij Medema, Vaassen, 2009) vanaf blz 91 het volgende:

‘Mensen (en andere primaten) kunnen zelf geen vitamine C aanmaken, in tegenstelling tot de meeste andere zoogdieren. Daarom moeten we iedere dag verse groente en fruit eten. Mensen missen een enzym (met de naam L-gulono-gamma-lactone oxidase, afgekort GLO) dat bij andere zoogdieren de laatste stap in de productie van vitamine C uit glucose verzorgt. Halverwege de jaren negentig van de twintigste eeuw is een verminderte versie van GLO gevonden in het menselijk genoom. Maar is dit een echt pseudo-gen, of is het een stukje willekeurig DNA dat een toevallige overeenkomst vertoont met het GLO-gen? Eind jaren negentig troffen Japanse onderzoekers bij de chimpansee, makaak en orang-oetang hetzelfde GLO-gen met dezelfde vermindering aan. Er zijn ook andere zoogdieren die geen vitamine C kunnen maken, zoals cavia’s. Ook bij deze dieren is een beschadigd GLO-gen aangetroffen, maar dit keer was het een andere beschadiging dan bij de mensen en mensapen. Dit alles suggereert heel sterk dat het GLO-gen bij een voorouder van de

primaten defect is geraakt. Het alternatief voor deze verklaring is de aannname dat bij mensen en mensapen dezelfde mutatie op dezelfde plek in hetzelfde gen is opgetreden, terwijl bijminder verwante soorten een andere mutatie het gen uitschakelde. Dat is wel heel erg toevallig, ook al omdat het GLO-gen niet het enige voorbeeld is van gedeelde mutaties. Andere genen blijken bij primaten wel aanwezig, maar zijn bij de mens defect geraakt ... Al deze bevindingen wijzen erop dat de mens een gemeenschappelijke voorouder deelt met andere primaten en dat sommige genen na de splitsing van de afstammingslijnen defect zijn geraakt.'

Lukt het om m.b.v. bioinformatica een fylogenetische boom op te stellen van het GLO-gen? Kun je nog andere voorbeelden vinden van gedeelde mutaties in genen?

Maak een verslag van je onderzoek.