

3. Is evolutie waar?

Kerst Th.Boersma, Didactiek van de Biologie, Universiteit Utrecht

3.1 Vragen en antwoorden

Een van de centrale vragen van ANW is ‘Wat is waar?’ Evolutie is een heel geschikt thema om deze vraag aan uit te werken, juist omdat evolutie hier en daar nog steeds een controversieel thema is. Volgens de meeste biologen is evolutie een van de (of zelfs hét centrale thema van de biologie en voor anderen doet de evolutiebiologie uitspraken zijn die strijdig zijn met hun geloof.

Bij beantwoording van de vraag of evolutie waar is worden verschillende invalshoeken uitgewerkt. Achtereenvolgens komen de volgende vragen aan de orde:

- de vraag of evolutie en geloof wel met elkaar in overeenstemming zijn te brengen (par. 3.2);
- de vraag of evolutietheorie wel waar is en of eigenlijk wel gesproken kan worden van ware wetenschappelijke kennis; daarbij wordt ondermeer ingegaan op de relatie tussen voorkennis en waarneming (par. 3.3);
- de vraag of er wel sprake is van één evolutietheorie, of dat er sprake is van meerdere evolutietheorieën (box 5).

Dit zijn niet alleen interessante wetenschapstheoretische vragen. Leerlingen komen zelf met dergelijke vragen. Wat doet u als een leerling u vraagt of evolutie bewezen is? Zegt u, als u biologie geeft en geen ANW, daar moet je leraar ANW maar een antwoord op geven, of probeert u een serieus antwoord te geven? En wat zegt u dan?

En wat doet u met een leerling die eigenlijk zegt dat het waar is omdat het in het boek staat? Moet u zeggen dat het boek niet deugt? Of dat het niet helemaal up-to-date is?

En als een leerling over natuurlijke selectie als mechanisme voor het ontstaan van nieuwe soorten zegt: ‘ik begrijp het wel, maar ik geloof het niet!’

Kortom, zodra u als u evolutie behandelt uw leerlingen de ruimte geeft, komen de vragen vanzelf. De vraag of evolutie waar is, is niet alleen een vraag die bij ANW beantwoord moet worden, maar een vraag die leerlingen zelf stellen. Wellicht kunt u de antwoorden die u uw leerlingen geeft voor een deel aan deze tekst ontleen.

3.2 Evolutie en geloof

Verschillen tussen evolutie en geloof

Of we spanning ervaren tussen levensovertuiging en evolutie hangt uiteraard samen met de manier waarop we zijn opgevoed en de mate waarin we onze eigen positie ten opzichte van het geloof waarmee we zijn opgegroeid hebben bepaald. Nu is levensovertuiging meer dan geloof alleen, ook mensen zonder geloof hebben een levensovertuiging. Bij een levensovertuiging gaat het in feite om de manier waarop we tegen de wereld en onze plaats daarin aankijken. Voor sommige mensen maakt geloof deel uit van de levensovertuiging, voor andere niet.

Onze opvatting over de wereld en onze plaats daarin wordt in sterke mate bepaald of medebepaald door de wetenschappelijke kennis die de in de loop van de eeuwen is opgebouwd. Wetenschap kan veel vragen beantwoorden en maakt daarbij gebruik van materialistische (of fysische) verklaringen en niet van bovennatuurlijke (of

metafysische) verklaringen. Voor de wetenschap is het belangrijk om geen metafysische verklaringen toe te laten (Haught, 2003; Mayr, 1997), omdat zich dan de situatie zou voordoen dat fysische verklaringen verworpen zouden worden omdat ze strijdig zijn met metafysische verklaringen. Vanuit de wetenschap bezien is een strikte scheiding tussen wetenschap en levensovertuiging dus noodzakelijk.

Karakteristiek voor wetenschap is dat theorie of hypothesen voortdurend getoetst worden aan de empirie en verworpen of bijgesteld worden als ze daar niet in voldoende mate mee in overeenstemming zijn. Wetenschap is daardoor een open kennissysteem. Wetenschap erkent ook dat op sommige vragen nog geen antwoord gegeven kan worden.

Wetenschap kan echter geen vragen beantwoorden die betrekking hebben op de zin van het leven, en ook niet op alle vragen over het ontstaan van de materie, of fysische constanten. Vragen daarover liggen buiten het bereik van de wetenschap en kunnen alleen vanuit bovennatuurlijke krachten, de metafysica worden verklaard, vanuit het geloof of een andere niet-toetsbare verklaring voor het ontstaan der dingen. Geloof is een gesloten kennissysteem, waarin opvattingen en verklaringen niet ter discussie staan. Dat is vooral het geval wanneer openbaring in geschriften, zoals de Bijbel of de Koran, een prominente plaats inneemt, en de heilige geschriften letterlijk worden opgevat.

Natuurwetenschap heeft echter, net als geloof, een aantal metafysische uitgangspunten die meestal niet ter discussie staan. Mayr (1997) noemt er drie. In de eerste plaats gaan we er in de natuurwetenschap van uit dat er een fysische wereld bestaat die onafhankelijk is van onze waarneming. Dat we waarnemen betekent dat er een fysische werkelijkheid is, ook al kan wat we waarnemen best iets anders zijn dan wat er in werkelijkheid is. Dat we fossielen waarnemen betekent niet a priori dat we resten van uitgestorven dieren waarnemen, maar dat we dingen waarnemen die we fossielen noemen. In de tweede plaats gaan we er in de natuurwetenschap van uit dat de fysische werkelijkheid niet structureloos is, maar orde of regelmaat vertoont en dat die regelmaat door natuurlijke oorzaken tot stand komt.. Natuurwetenschap is onbestaanbaar als we niet accepteren dat er regelmaat en ordening in de wereld is. Herkenning van ordening en regelmaat is voor mensen en andere organismen noodzakelijk om te kunnen bestaan. In de derde plaats gaan we er van uit dat er sprake is van continuïteit in de wereld. Dat betekent dat fysische constanten, zoals zwaartekracht en de samenstelling van de atmosfeer, of constant zijn of zich geleidelijk aan hebben ontwikkeld. Als we ons bewust zijn van deze metafysische uitgangspunten van natuurwetenschap, begrijpen we ook waarom sommige natuurwetenschappers onrustig worden als de rol van het toeval bij het ontstaan van het leven wordt benadrukt, als getwijfeld wordt aan de constantie van de zwaartekracht, of als catastrofes worden gehanteerd om verklaringen te geven voor de opeenvolging van soorten in de aardgeschiedenis.

Biologen die gelovig zijn lossen die spanning meestal op door vast te houden aan een strikte scheiding van wetenschap en geloof. Feitelijk komt dat neer op strikte scheiding tussen twee contexten. Voor natuurwetenschappers die in schepping geloven kan dat betekenen dat zij dagelijks twee keer de grens oversteken tussen geloof en natuurwetenschap, heen en terug. Zij hebben geleerd om in twee grotendeels van elkaar gescheiden werelden te denken.

Relatie tussen geloof en evolutie

Ook al zijn natuurwetenschappers van mening dat wetenschap en geloof twee gescheiden domeinen zijn, dan wil dat natuurlijk niet zeggen dat iedereen die geen natuurwetenschapper is dat ook vindt. In dat geval kunnen geloof en natuurwetenschap in een spanningsvolle relatie tot elkaar staan, zeker als het om evolutie gaat. Als je geloof je leert dat de wereld geschapen is en evolutionisten beweren dat de wereld door evolutie is ontstaan, dan zijn dat twee standpunten die elkaar uitsluiten. De verschillende opvattingen over de relatie tussen geloof en evolutie kunnen we goed weergeven als gebruik maken van de mate waarin mensen schepping en/of evolutie accepteren, en de mate waarin zij een onderscheid maken tussen metafysische en fysische verklaringen.(figuur 1).

Figuur 1. Relaties tussen geloof en evolutie; daarbij is niet alleen aangegeven in hoeverre schepping en/of evolutie wordt geaccepteerd, maar ook de mate waarin de fysische en metafysische wereld van elkaar gescheiden worden.

<i>Relatie fysica en metafysica</i>	<i>Theïsten</i>			<i>Atheïsten</i>
	<i>Schepping</i>	<i>Schepping en micro-evolutie</i>	<i>Schepping en evolutie</i>	<i>Evolutie</i>
1. Vanuit metafysica uitspraken over fysica	Creationisten	ID-aanhangers		
2. Vanuit fysica uitspraken over metafysica				Evolutionair materialisten
3. Fysica en metafysica gescheiden			Evolutionisten	Evolutionisten
4. Fysica en metafysica complementair			Evolutionair theïsten	
5. Geen metafysica				Evolutionisten

Als het gaat om de vraag of schepping en/of evolutie worden geaccepteerd, kunnen we een onderscheid maken tussen mensen die alleen schepping accepteren en evolutie verwerpen (creationisten), mensen die uitgaan van schepping, maar micro-evolutie, dat wil zeggen evolutie binnen de soort, accepteren (onder meer aanhangers van Intelligent Design), mensen die schepping en evolutie beide accepteren (veel minder orthodoxe christenen), en mensen die alleen evolutie accepteren (atheïsten). Ten aanzien van het onderscheid tussen fysische en metafysische verklaringen worden een aantal verschillende posities ingenomen. Creationisten en aanhangers van Intelligent design doen vanuit hun geloof in schepping uitspraken over het ontstaan van de materiële wereld. ID-aanhangers als Johnson (1991) en Behe (1996) verwerpen het materialisme en streven een op religieuze uitgangspunten gebaseerde wetenschap na. In feite doen zij dus vanuit de metafysica uitspraken over de wereld van de fysica.

Het omgekeerde, dat uit de fysica uitsprakengedaan worden over de metafysica, komt echter ook voor. Auteurs als Dennett (1995) en Dawkins (1989) betrekken hun materialistische verklaringen niet alleen op de fysische wereld, maar ook op de metafysische. Vanuit fysische verklaringen komen zij dan tot uitspraken als dat zij 'God nooit zijn tegengekomen'. Deze evolutionair evolutionisten dragen aanzienlijk bij aan de controverse in de VS (zie ook Miller, 1999).

De volgende positie is dat fysica en metafysica goed van elkaar gescheiden zijn. Dit is het favoriete standpunt van gelovige wetenschappers.

Een heel bijzonder standpunt over de relatie tussen fysica en metafysica wordt ingenomen door de theoloog Haught (2003), die de fysische en metafysische wereld als complementair aan elkaar ziet. Haught accepteert niet alleen evolutie, maar ook de evolutionaire psychologie, die evolutionaire verklaringen geeft voor de mentale functies van de mens. Daarmee accepteert hij dat geloof zich aanpast aan de ruimte die evolutietheorie in ruime zin over laat. Zijn positie kan aangeduid worden als evolutionair theïsme, en staat ver af van de standpunten die de grote religies over evolutie innemen.

Tot slot is er dan nog de positie waarbij geen uitspraken gedaan worden over de metafysica, of het bestaan van de metafysica zelfs ontkend wordt. Voor veel natuurwetenschappers, en met name voor evolutiebiologen (evolutionisten) is dit de favoriete positie. Zij beperken zich tot fysische verklaringen en doen geen uitspraken over de metafysische wereld.

Leerlingen over geloof en evolutie

De hierboven geschetste posities over de relatie tussen evolutie en geloof kunnen we ook tegenkomen als we met leerlingen daarover een gesprek voeren. De meeste leerlingen zijn echter, voor zover ze gelovig zijn, nog niet in aanraking gekomen met evolutie. Dat betekent dat als evolutie bij ANW of biologie wordt geïntroduceerd leerlingen ook voor het eerst met een spanning of conflict tussen evolutie en geloof in aanraking kunnen komen. De volgende twee uitspraken illustreren dat.

Oke. En nu denk ik, nu wordt het verwarrend. Kijk, waar ik nu over denk is dat wat ik geleerd heb in de kerk en wat ik geleerd heb bij biologie. Ik weet het niet. Ik zou zeggen ... Ik weet niet wat er voor de mens kwam behalve dinosauriërs en daarna weet ik dat de mens is geschapen door God. Dat is wat ik altijd heb geloofd. God heeft Adam en Eva op aarde en van daaruit ons allen... Ik weet gewoon niet wat ik er van moet denken. (Hendrikse, 1998)

Ik ben religieus en ik geloof in natuurwetenschap. Daardoor raak ik in de war en kan ik geen antwoord geven op de vraag welke van de twee nu waar is. Ik raak met name in de war als ik er dieper over nadenk. Ik kies dan maar voor de veilige oplossing, door de vraag welke van de twee waar is maar niet te stellen. (Dagher & BouJaoude, 1997)

De vraag is natuurlijk of het nu een veelvoorkomend probleem is of niet. De ervaring leert dat de meeste leerlingen op openbare en katholieke scholen weinig moeite met evolutie hebben. Toch zijn er altijd een aantal leerlingen, bijvoorbeeld orthodox christelijke of moslim leerlingen, voor wie dat anders ligt, en die in verwarring kunnen komen of een kunnen conflict ervaren als zij op school voor het eerst met evolutie in aanraking komen. Met name in de grote steden, waar veel allochtone leerlingen aan het onderwijs deelnemen, kan verwacht worden dat dit probleem

regelmatig voorkomt. Dat geldt zeker ook op reformatorische scholen, waar geloof en evolutie meestal naast elkaar worden gezet. Kortom, biologie- (en ANW-)leraren lopen de kans dat zij als zij evolutie introduceren een deel van hun leerlingen onbedoeld met een probleem opzadelen. Veel leraren negeren het probleem, doordat zij alleen op de biologische inhoud van evolutie ingaan.

Als we onze pedagogische taak serieus nemen negeren we het probleem niet, maar zoeken we naar een manier waarop we leerlingen kunnen helpen een eigen positie te bepalen ten aanzien van de relatie tussen evolutie en geloof. Dat betekent in ieder geval dat we het probleem niet mogen negeren en daar expliciet op in zullen moeten gaan. Daarbij staat niet ter discussie dat alle leerlingen geïnformeerd moeten zijn over evolutie en evolutietheorie, omdat kennis daarvan behoort tot het cultuurgoed van onze samenleving. Evenmin ter discussie staat dat leerlingen recht hebben op hun eigen levensovertuiging en dat het niet de taak van de school is om hen te bekeren tot evolutie, of andersom.

Als we recht willen doen aan verschillende opvattingen over geloof en evolutie is de enige mogelijkheid om leerlingen uit te nodigen hun eigen standpunt daarover in te nemen en dat kenbaar te maken. Discussie daarover kan dan leiden tot verheldering en, voor wie dat van belang is, tot nadere afbakening van geloof en wetenschap ten opzichte van elkaar. De taak van de leraar is dan om standpunten van leerlingen te helpen verwoorden, er op toe te zien dat ze serieus worden genomen, en om zonnodig nog niet genoemde standpunten in te brengen. Daarbij is het verstandig om terughoudend te zijn met de eigen opvattingen. Als leraar moet je de rol van deskundige kunnen vervullen, ook voor leerlingen die een andere levensovertuiging hebben. Dat gaat gemakkelijker als leerlingen merken dat hun opvatting niet wordt afgewezen en als de leraar zijn autoriteit niet verbind met een specifieke levensovertuiging.

Een belangrijk punt bij een 'intercultureel gesprek' over de relatie evolutie en geloof (zie box 1) is dat leerlingen leren inzien dat geloof en evolutie elkaar niet hoeven uit te sluiten en op verschillende manieren ten opzichte van elkaar kunnen worden afgebakend (Hendrikse & Boersma, 1999). Daarmee kan dan wellicht de veronderstelling vermeden worden dat geloof en evolutie niet met elkaar in overeenstemming zijn te brengen. Kernpunt daarbij is discussie over de vraag op welke punten geloof uitspraken zou moeten doen en op welke punten wetenschap of wetenschappelijk onderzoek. Als je er van uit gaat dat God de veroorzaker van evolutie is, maar verder geen invloed heeft op het verloop van de evolutie, dan kunnen alle punten, ook over het ontstaan van de mens en het leven door de wetenschap aan de orde worden gesteld. Doe je dat niet, dan ontkom je er niet aan om nauwkeuriger aan te geven wat het werk van God is en wat door natuurlijke processen tot stand is gekomen. Voor veel mensen is evolutie geen probleem, zolang we er maar niet het ontstaan van de mens en het ontstaan van het leven mee proberen te verklaren. Onderstaande uitspraken laten zien dat ook leerlingen geloof en evolutie op verschillende manieren ten opzichte van elkaar kunnen afbakenen.

Volgens mij is evolutie best mogelijk, maar er moet in het allereerste begin toch iets of iemand geweest zijn die dit heeft gemaakt. (Hendrikse, 1998)

Alle oertypes zijn geschapen. Er ontstaan op natuurlijke wijze geen nieuwe soorten door de tijd heen. Door toedoen van de mens ontstaan er wel nieuwe soorten. Soorten veranderen wel door de tijd heen. Er treden wel mutaties op. Op eigenschappen vindt natuurlijke selectie

Box 1: Een ‘intercultureel gesprek’ over evolutie en geloof.

1. Bij het begin van het thema evolutie zet de leraar zet uiteen dat sommige mensen vinden dat evolutie en geloof niet samengaan, terwijl anderen daar geen problemen mee hebben. Vervolgens gaat hij/zij in op de verschillen tussen wetenschappelijke kennis en geloof en dat de meeste mensen, gelovig of niet, deze verschillen accepteren. Daarbij nodigt hij/zij enkele leerlingen uit om uit te leggen waar wetenschap en geloof zich op baseren om vast te stellen of iets waar is of niet.
2. Vervolgens stelt de leraar in een klassengesprek de vraag aan de orde of religieuze opvattingen wel ten grondslag mogen liggen aan wetenschappelijke opvattingen, of dat beide van elkaar gescheiden moeten blijven. Hij probeert leerlingen met verschillende opvattingen hierover aan het woord te laten en verduidelijkt waarom vanuit de wetenschap gezien beide van elkaar gescheiden horen te blijven
3. De leraar beschrijft vervolgens de meest voorkomende opvattingen die in figuur 1 zijn weergegeven: creationisme, Intelligent Design, evolutionair theïsme en evolutionisme.
4. De leraar vraagt aan leerlingen op te schrijven in welke positie zij zich herkennen. Leerlingen die een theïstische levensbeschouwelijke positie kiezen worden uitgenodigd om, voor zover zij dat kunnen, aan te geven wat het werk van God is en welke plaats zij eventueel aan evolutie toekennen. Zorgvuldig wordt omgegaan met leerlingen met minderheidsposities, en met leerlingen die het moeilijk vinden hun mening hierover onder woorden te brengen.
5. De leraar zet uiteen dat iedereen, ook al verwerpt hij evolutie, moet weten hoe volgens de wetenschap evolutie werkt. Het is heel gewoon om op school ook iets te leren over zaken waar je het niet mee eens bent (kolonialisme, milieuvervuiling, etc.). Hij/zij geeft een overzicht van het verdere programma.
6. Bij de afsluiting van het thema evolutie kan het gesprek over evolutie en levensovertuiging worden hervat. Dan kan expliciet de vraag worden bediscussieerd in hoeverre zij nu accepteren dat soorten, het leven en de mens door evolutie zijn ontstaan.

plaats. Ik zou me wel voor kunnen stellen, als eenden vroeger geen zwemvliezen hadden en dat ze op het land liepen, dat door een mutatie één van die eenden wel zwemvliezen kreeg, dat hij een keer in het water viel en dat hij toen ging zwemmen. Dat de populatie op het land door een vijand uitstierf en dat die beesten in het water wel konden leven. Dat je op een gegeven moment allemaal eenden hebt met zwemvliezen tussen de poten. Dat zou wel kunnen denk ik, maar dat is zo verschrikkelijk toevallig. ... Eigenschappen ontstaan niet omdat ze nodig zijn. (Hendrikse, 1998)

Ik ben het er niet mee eens dat de mens uit lagere inferieure dieren is ontstaan, maar andere soorten kunnen best uit een enkele voorouder zijn ontstaan. (Dagher & BouJaoude, 1997)

Hoe moet je nu met leerlingen met creationistische levensbeschouwing omgaan als evolutie wordt behandeld? Hen help je niet door een onderscheid tussen geloof en wetenschap te maken, omdat zij dat onderscheid niet accepteren. Veel creationisten hebben daar een voor henzelf bevredigend antwoord op gevonden. Leerlingen met een orthodox christelijke levensovertuiging zijn van huis uit vaak goed over evolutie geïnformeerd. Ze weten hoe volgens de evolutietheorie nieuwe soorten ontstaan en hebben geleerd die theorie te verwerpen. Daarbij maken ze een verschil te maken tussen weten en geloven. Onderstaande uitspraak illustreert dat.

Ten aanzien van de oorsprong van de mens weerhoudt mijn geloof me er van het principe van evolutie te accepteren. Maar dat betekent niet dat het onlogisch is, het betekent dat op dit punt mijn geloof sterker is dan mijn ratio. (Dagher & BouJaoude, 1997)

Leerlingen met creationistische opvattingen kunnen we dus ondersteunen door duidelijk te maken dat we accepteren dat ze een onderscheid maken tussen weten en geloven. We helpen hen door hen te leren daarbij de goede argumenten te gebruiken. Ze hoeven de evolutietheorie niet te ontzenuwen met wetenschappelijke argumenten, daar slagen zij vanuit het standpunt van de reguliere wetenschap toch niet in. Hun argumentatie moeten ze ontlenuwen aan hun geloof en hun interpretatie van de Bijbel of de Koran.

3.3 Evolutie en evolutietheorie

De ontwikkeling van evolutietheorie

Evolutie was toen Charles Darwin (1809–1882) in 1859 *The Origin of Species* publiceerde geen nieuw idee. Anderen, zoals zijn grootvader Erasmus Darwin (1731-1802) en Jean Baptiste De Lamarck (1744 – 1829), die zich los konden maken van een religieuze context, hadden dat idee ook al geopperd. Evolutie is ook een redelijk voor de hand liggend idee als je een aantal dingen op een rijtje zet en als je levensbeschouwing ruimte laat voor dat soort ketterse ideeën.

Mensen zijn al honderden jaren bekend met het verschijnsel fossielen. Ook al heb je geen idee over de ouderdom, dan nog is het raar dat je versteende schelpen, die lijken op de schelpen op het strand, honderden meters boven de zeespiegel in gesteente aantreft. Je komt dan gemakkelijk tot de conclusie, als je je tenminste, nogmaals, kunt losmaken van een religieuze context, dat fossielen (a) verwant zijn aan vormen die we nu kennen en (b) restanten van uitgestorven organismen zijn. Net zoals dat met families het geval is, kom je dan op het idee dat de ene vorm uit de andere is ontstaan. Dat wordt dan afgebeeld in een stamboom, net zoals je een familiestamboom kunt afbeelden. Het idee evolutie kan afgebeeld worden in een stamboom.

De zelfde redenering kunnen we hanteren als we skeletten van vertebraten met elkaar vergelijken. Weer ligt het idee voor de hand dat hoe meer skeletten op elkaar lijken, hoe meer ze aan elkaar verwant zijn. Het zelfde geldt als we, in navolging van Haeckel, de embryonale ontwikkeling van vertebraten met elkaar vergelijken.

Taxonomisch onderzoek van fossielen, vergelijkend morfologisch en embryologisch onderzoek en geografisch onderzoek, leidt gemakkelijk tot een idee van verwantschap. En het idee dat soorten familie van elkaar zijn, leidt weer gemakkelijk tot de gedachte dat ze uit elkaar zijn ontstaan, als onze levensovertuiging die gedachte tenminste toelaat.

Het idee evolutie is een belangrijk idee, omdat we er een aantal voorspellingen mee kunnen doen die empirisch kunnen worden getoetst. Zo kunnen we voorspellen en toetsen dat fossielen in de meeste gevallen minder op recente soorten zullen lijken naarmate ze ouder zijn. Paleontologen onderkenden dat al in de 19^e eeuw, dus lang voordat datering met behulp van radioactieve isotopen mogelijk was. Ze ontwierpen een relatieve tijdsschaal, op basis van de fossielen die ze aantroffen in opeenvolgingen van gesteentelagen.

Box 2: Tijdas en evolutionaire geschiedenis

De evolutionaire geschiedenis is in boeken en wandplaten vaak zodanig afgebeeld dat geen rekening is gehouden met de duur van perioden. Leerlingen krijgen daardoor geen goed beeld van de duur van de evolutionaire geschiedenis. Leerlingen kunnen daar echter een concreet beeld van krijgen als zij het leven op aarde op een lange strook papier (bijvoorbeeld een kassarol) op de goede verhouding afbeelden. Ze kunnen de grote tijdperken aanduiden, de perioden, een paar bekende feiten plaatsen (bijvoorbeeld: de dinosauriërs en de opkomst van de mens) en de momenten van grote extincties en meteorietinslagen. Na het uitleggen van de kassarol, die zo'n vijf meter lang wordt als je aanneemt dat 1 cm = een miljoen jaar, kunnen leerlingen met passen uitmeten hoelang het preCambrium geduurd heeft en wanneer de aarde gevormd is. Voor deze activiteit moet je voldoende ruimte, bijvoorbeeld op een gang, hebben.

Het idee evolutie is nog geen evolutietheorie. Darwins theorie van natuurlijke selectie geeft een verklaring voor het ontstaan van nieuwe soorten. Hij was zich daarbij goed bewust dat natuurlijke selectie alleen een verklaring geeft voor adaptatie van populaties en niet voor de manier waarop erfelijke informatie wordt overgeërfd en de manier waarop variabiliteit in een populatie behouden blijft. In Darwins tijd was nog niet bekend hoe erfelijke informatie wordt overgedragen, ook al was Mendel een tijdgenoot van hem. Pas omstreeks 1930 werd de genetica verbonden met de theorie van natuurlijke selectie. Sindsdien spreken we niet meer over Darwinisme, maar over Neodarwinisme.

Kernpunt in deze korte schets van de ontwikkeling van de evolutietheorie is dat de theorie van natuurlijke selectie niet logisch afleidbaar is uit de empirische kennis waar deze theorie een verklaring voor geeft. Theoretische kennis laat zich niet door logisch redeneren uit empirische kennis afleiden. Darwin had een idee vanuit een andere context voor nodig om zijn theorie van natuurlijke selectie te kunnen ontwikkelen. Zijn idee voor een mogelijke verklaring ontleende hij. Voor Darwin waren dat met name zijn kennis van het fokken van honden en paarden en de ideeën van Lyell en Malthus. De geoloog Charles Lyell schreef veranderingen van de aarde toe aan continue fysische processen en niet aan catastrofes. De econoom Thomas Malthus wees op de discrepantie tussen exponentiële groei van de bevolking en de lineaire toename van de beschikbare voedselvoorraden.

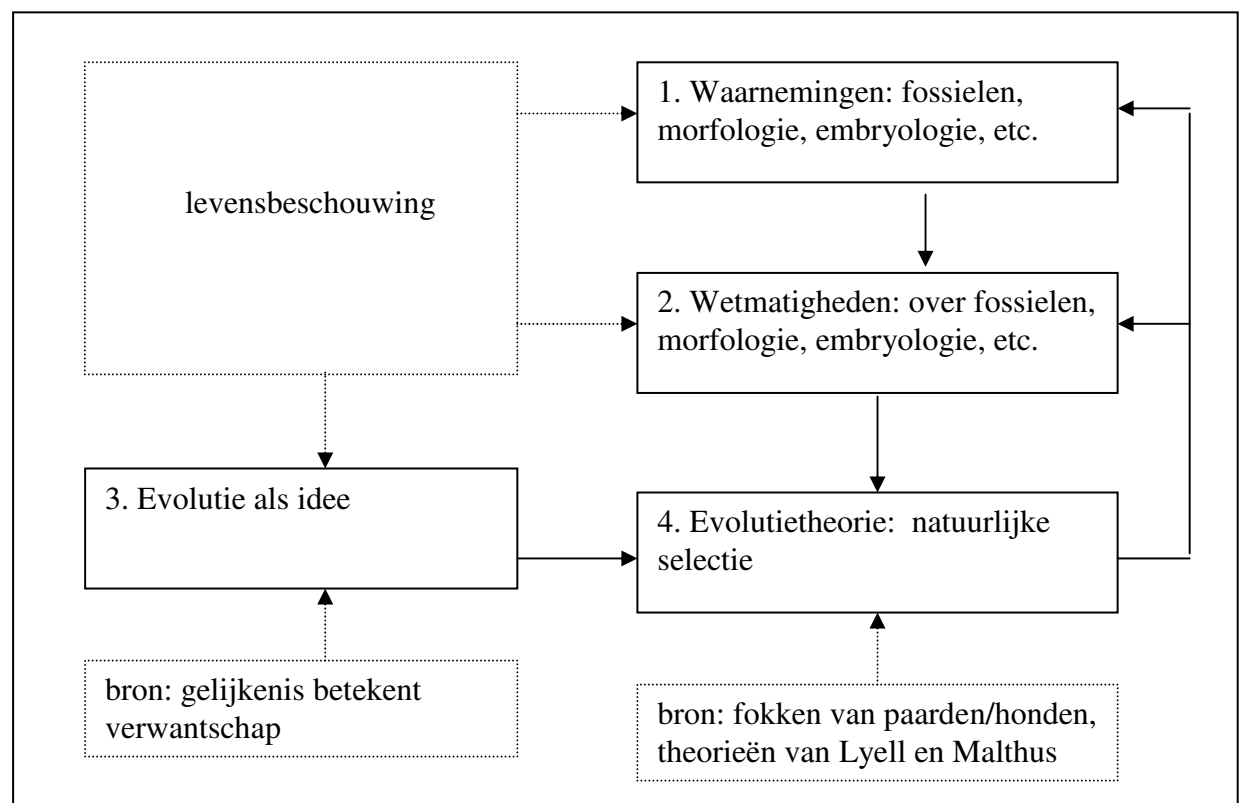
Als we terugzien op de gevolgde redenering, en we ons voor het gemak beperken tot fossielen, kunnen we historisch gezien in de ontwikkeling van de kennis over evolutie achtereenvolgens de volgende vier stappen onderscheiden:

- 1) Aan in gesteenten aangetroffen fossielen worden waarnemingen gedaan.

- 2) Op grond van vergelijking van fossielen met recente organismen wordt opgemerkt dat ze op elkaar lijken. Fossielen die in opeenvolgende gesteentelagen voorkomen worden met elkaar vergeleken en er worden conclusies getrokken over hun relatieve ouderdom. Wetmatigheden in het voorkomen van fossielen worden gesignaleerd.
- 3) Doordat deze wetmatigheden vergeleken worden met familierelaties en stambomen ontstaat het idee dat waarnemingen en wetmatigheden over fossielen verklaard kunnen worden door evolutie. Het idee evolutie ontstaat door kennis van fossielen te relateren aan kennis die in dagelijkse context is verworven.
- 4) Een verklaring voor evolutie wordt gebaseerd op empirische kennis van fossielen (etc.), het idee evolutie, kennis van het fokken van paarden en honden, en de theorieën van Lyell (1797 – 1875) en Malthus (1766 – 1834) De evolutietheorie, de theorie van natuurlijke selectie, verklaart het ontstaan van nieuwe soorten.

De relaties tussen de vier stappen in de ontwikkeling in de kennis van evolutie zijn afgebeeld in figuur 2. Behalve de vier stappen zijn ook de bronnen voor het idee evolutie en evolutietheorie, maar ook het wereldbeeld afgebeeld. Het wereldbeeld omvat naast de levensbeschouwing ook beschouwingen over de aard der dingen en van onze kennis daarover (Cobern, 2000). Het wereldbeeld is van belang, omdat kennis over evolutie zich alleen kan ontwikkelen als het wereldbeeld daar ruimte voor laat (zie par. 3.1). De vier stappen geven overigens niet alleen de historische ontwikkeling van kennis over evolutie weer. De vier stappen zijn ook op te vatten als vier categorieën van kennis over evolutie.

Figuur 2. De historische ontwikkeling van kennis over evolutie.



Figuur 2 laat verder zien dat op grond van de theorie van natuurlijke selectie geen uitspraken kunnen worden gedaan over wetmatigheden en waarnemingen, die het karakter hebben van hypothesen. Zo kunnen we verwachten dat *als* de theorie van natuurlijke selectie geldt, we *dan* fossielen zullen vinden waarvan eigenschappen in de loop der tijd geleidelijk veranderen. Als hypothesen als deze gesteund worden door nieuwe empirische gegevens vatten we dat op als ondersteuning van de theorie van natuurlijke selectie.

Is evolutietheorie bewezen?

Aan bovenstaande kennistheoretische beschouwing kunnen we een antwoord ontlenen op de vraag van leerlingen of evolutietheorie bewezen is. Het antwoord op die vraag is 'nee'. Niet omdat evolutietheorie niet deugt, maar omdat theorie niet te bewijzen is. Dat geldt niet alleen voor evolutietheorie alleen, maar voor alle theorie. Theorie is niet waar of onwaar, maar meer of minder bruikbaar omdat we er meer of minder verschijnselen mee kunnen verklaren. De waarde van een theorie wordt bepaald door de mate waarin daar empirische verschijnselen worden verklaard, het gaat om consistentie tussen onze empirische kennis theorie. Als er te veel discrepanties tussen theorie en empirie zijn, dan wordt de theorie verworpen en gezocht naar een nieuwe theorie. Zijn er weinig discrepanties dan wordt de theorie aangepast of aangevuld. De theorie van natuurlijke selectie wordt door biologen vrijwel unaniem aanvaard. De wetenschappelijke discussie gaat dan ook niet over de vraag of de theorie van natuurlijke selectie geldig is, maar over de vraag in hoeverre naast natuurlijke selectie ook andere mechanismen een rol spelen. Daarbij worden ruwweg twee standpunten ingenomen. Het eerste standpunt, onder meer aangehangen door Dennett (1995), houdt vast aan het idee dat alle veranderingen geleidelijk aan en in kleine stappen verlopen en dat het mechanisme van natuurlijke selectie daar een voldoende verklaring voor biedt. Het tweede standpunt, met name vertolkt door Gould (1990, 1991), gaat er van uit dat evolutie niet alleen in kleine stappen is verlopen, maar soms ook in grote stappen. Grote stappen of versnellingen in de evolutie kunnen verklaard worden door catastrofes die zich in de loop van de aardgeschiedenis enkele malen hebben voorgedaan, en door mechanismen als zelforganisatie (zie: box 4).

Als we leerlingen een goed antwoord willen geven moeten we dát antwoord geven. Dat is een omstandig antwoord en het kan pas worden gegeven als leerlingen het begrip natuurlijke selectie in voldoende mate beheersen. Daarbij moeten we ons realiseren dat de manier waarop het begrip theorie hier is gebruikt afwijkt van de manier waarop leerlingen zelf dat begrip gebruiken. Veel leerlingen noemen een informatieve tekst in hun leerboek theorie, of alles wat niet praktisch is.

Kennisgeladenheid van de waarneming

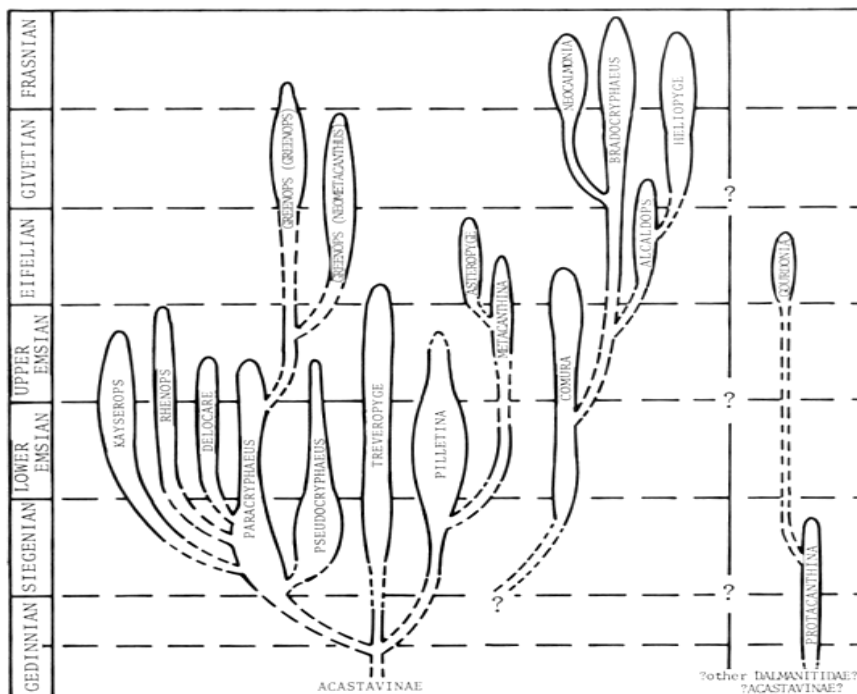
Met de eis die we aan theorie stellen, dat theorie een verklaring moet kunnen geven voor empirische gegevens, komen op een lastig punt. Op het moment dat we theorie accepteren, kijken we ook vanuit dat perspectief naar empirische gegevens. Zodra we van evolutie uitgaan, kunnen we fossielen niet anders meer zien dan als uitgestorven organismen uit een lang verleden. En op het moment dat we fossielen van een zelfde geslacht (genus) verzamelen in één gesteentepakket, komt vanzelf de vraag op hoe het met de fylogenetische verwantschap is gesteld en tekenen we, als we die vraag hebben beantwoord, een stamboom. Figuur 3 laat een stamboom zien van de Asteropyginae,

Box 3: Fossielen

Leerlingen vinden het meestal leuk om actief aan de slag te gaan met fossielen. Soms heeft de school een collectie, soms is het haalbaar om leerlingen zelf vondsten te laten meenemen (uit de kalkrotsen bij Dover, of uit de Atlas in Marokko waar veel ammonieten en trilobieten gevonden worden), of je kunt gebruik maken van musea zoals Natura Docet in Denekamp of Naturalis in Leiden. Leerlingen vinden het heel spannend om zelf fossielen te mogen bekijken, uit te rekenen hoeveel keer ouder het fossiel is dan zichzelf en te bedenken in welk milieu het organisme leefde.

een subfamilie Devonische trilobieten. De auteur heeft de door hem gevonden fossielen gedetermineerd door ze te vergelijken met vondsten die elders zijn gedaan. Doordat van die vondsten de relatieve ouderdom was vastgesteld, kon hij zijn eigen materiaal correleren met de standaardverdeling in etages die voor het Devoon wordt gehanteerd. De auteur twijfelt niet over zijn werkwijze, laat staan dat hij twijfelt over evolutie. Zijn enige twijfel is hoe de verschillende geslachten uit elkaar zijn ontstaan en wanneer deze splitsing in geslachten is ontstaan. Op grond van de fossielen die hij heeft gevonden kan hij daarover echter niets zeggen. Sterker, omdat hij weet dat de verschillende geslachten uit elkaar zijn ontstaan, kunnen we rustig aannemen dat hij gezocht heeft naar tussenvormen. Kortom, zijn hele werkwijze is bepaald door het perspectief van evolutie. Het idee evolutie bepaalt hoe hij zijn materiaal interpreteert en, omdat er van uitgaat dat hij weet onder wat voor omstandigheden trilobieten leefden, waarschijnlijk ook voor een deel, waar hij materiaal verzamelt.

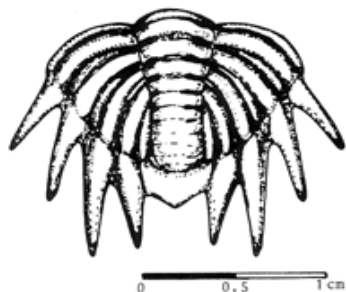
Figuur 3. Fylogenie van de Asteropyginae (Smeenk, 1983).



Het fenomeen, dat we bij onze waarneming niet los kunnen komen van wat we weten, noem ik kennisgeladenheid van de waarneming. Kennisgeladenheid van de waarneming is een algemeen menselijk fenomeen, dat zeker niet alleen geldt voor

evolutiebiologen of voor kenner van Devonische trilobieten. Als u naar figuur 4 kijkt en u bent niet thuis in de paleontologie, dan is de kans groot dat u in dit object geen staartstuk (pygidium) van een trilobiet herkent.

Figuur 4. Object (zie tekst).



En als u geen specialist bent in Devonische trilobieten herkent u ongetwijfeld hierin niet het door dezelfde auteur beschreven nieuwe soort, *Neocalmonia cantabrica*. Kennisgeladenheid van de waarneming is onontkoombaar doordat we wat we weten niet kunnen uitschakelen. Dat is geen probleem zolang we een onderscheid maken tussen waarneming en interpretatie, zoals in fig.3, en onze 'vooringenomenheid' niet doorschiet. Soms ontstaat er echter een zodanige vertekening dat het resultaat op zijn minst discutabel is. Ik wil dat illustreren met figuur 5. Figuur 5 laat een afbeelding zien van wat wel de Wet van Haeckel wordt genoemd. Deze in 1891 door Haeckel geformuleerde 'wet' stelt dat de ontogenie een recapitulatie is van de evolutie. Het figuur is een bewerking van de originele afbeelding van Haeckel.

Om didactische redenen zijn, naar we mogen aannemen, drie stadia in de embryonale ontwikkeling van enkele vertebraten even groot afgebeeld. Bovendien is gekozen voor een opeenvolging waarin links de meeste primitieve vertebraat, een vis, staat afgebeeld en helemaal rechts de mens als laatste loot aan de stam. De bedoeling is, naar we mogen aannemen, niet om de embryologie van verschillende vertebraten te kunnen vergelijken, maar om te laten zien dat vergelijking van de embryonale ontwikkeling een aanwijzing voor evolutie oplevert.

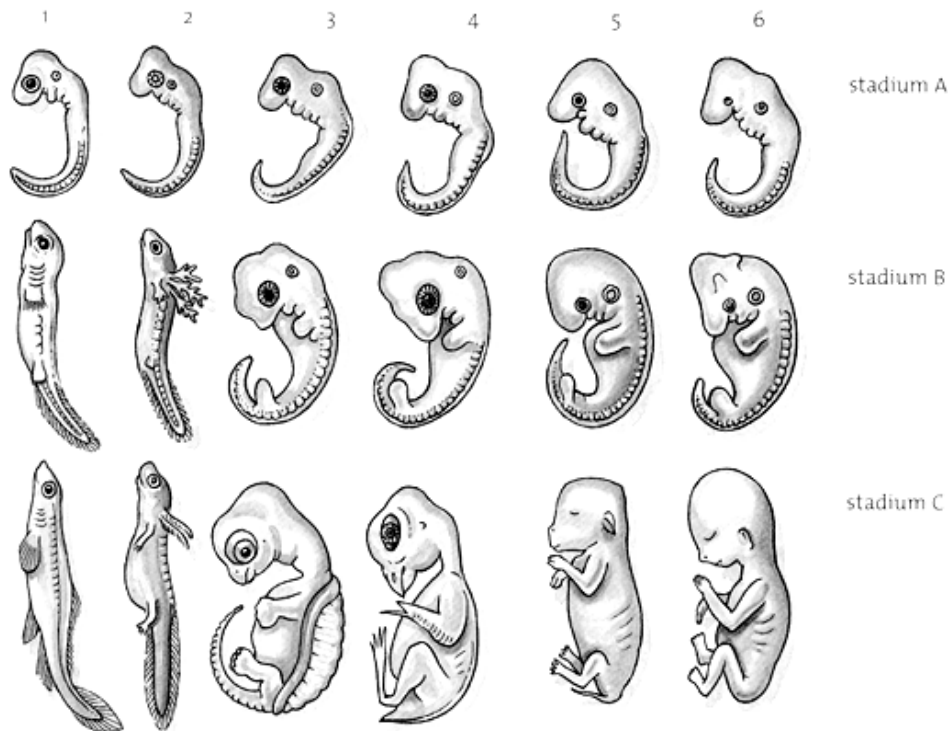
Inmiddels weten we dat de Wet van Haeckel onjuist is. Embryo's van de ene klasse vertebraten lijken nooit meer dan oppervlakkig op volwassenen van andere klassen. Wells (1999) laat zien dat Haeckel alleen die vertebraten in zijn schema opnam die in het algemene beeld pasten en dat de eerste stadia in de ontwikkeling volledig zijn weggelaten. Terwijl zich juist in de eerste stadia in de ontwikkeling van verschillende klassen van vertebraten grote verschillen voordoen. We kunnen in het midden laten of Haeckel zo overtuigd was van evolutie dat hij bij zijn weegave zag wat anderen niet zagen, of dat hij weloverwogen fraudeerde..

Kennisgeladenheid van de waarneming is onontkoombaar. In normale gevallen leidt neemt daardoor consistentie tussen theorie en empirie toe. In extreme gevallen, zoals met de Wet van Haeckel, kan het er echter toe leiden dat met de theorie strijdige empirische gegevens niet meer worden waargenomen. Andere onderzoekers moeten dan corrigerend optreden.

Stambomen

Een stamboom zoals in figuur 3 illustreert de kennisgeladenheid van de waarneming. Dat zien we nog scherper als we verschillende typen stambomen met elkaar vergelijken. We zien dan dat vanuit verschillende gezichtspunten niet alleen

Figuur 5. Drie stadia in de embryonale ontwikkeling van vertebraten (uit: *Biologie voor jou*, vwo B2(1))



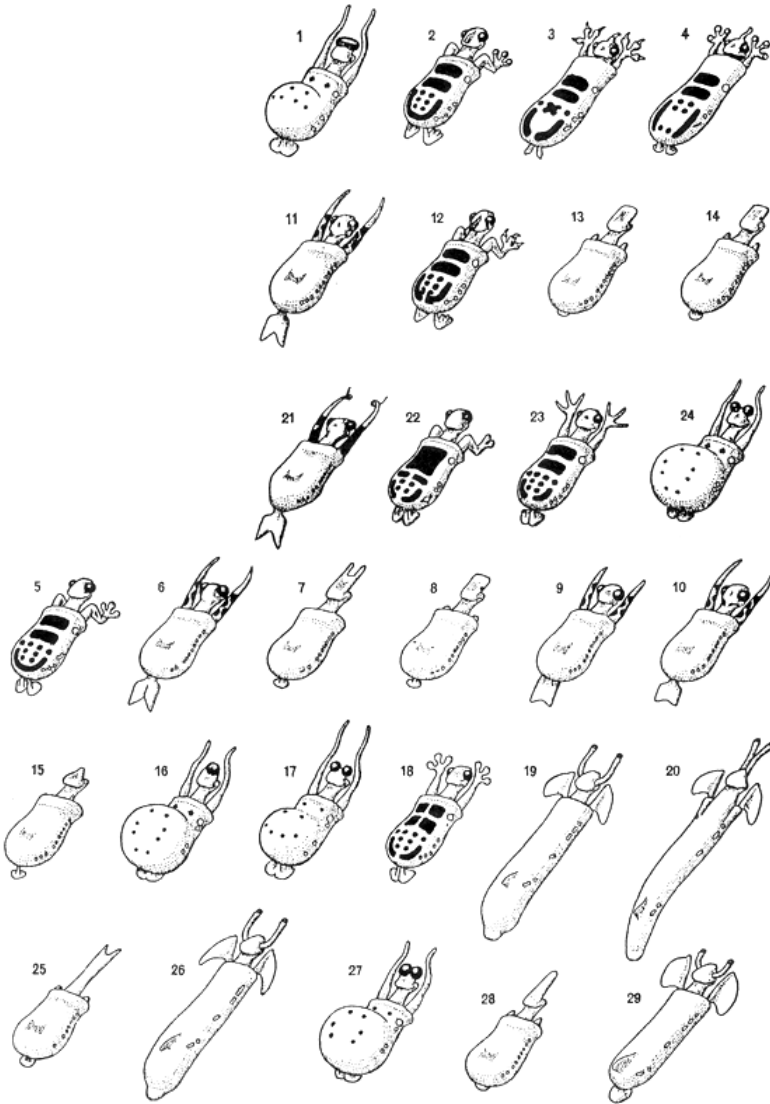
verschillende stambomen geconstrueerd worden, maar ook dat verschillende conclusies getrokken kunnen worden over de verwantschap. Dat effect wordt nog versterkt doordat voor de constructie van verschillende typen stambomen ook verschillende methoden en technieken worden gehanteerd.

Wat als fossielen is terug gevonden is maar een fractie van ooit heeft geleefd. En paleontologen moeten het doen met fragmenten van een fractie wat ooit heeft geleefd. In de meeste gevallen stelden zij stambomen op door fossielen niet alleen onderling te vergelijken, maar ook met recente organismen. Dat is veel lastiger als het gaat om organismen zijn uitgestorven. Waarmee moet je uitgestorven diergroepen vergelijken? Hoe betrouwbaar is in die gevallen vergelijkend morfologisch onderzoek? Trouwens, in het algemeen berust vergelijkend morfologisch onderzoek op de aanname dat we weten welke kenmerken voor het onderscheiden van soorten van belang zijn en welke afgedaan kunnen worden als intraspecifieke variatie. Om aan deze subjectiviteit te ontkomen zijn de afgelopen decennia twee andere benaderingen ontwikkeld waarmee verwantschap kan worden bepaald: met numerieke taxonomie en door de overeenkomst van de basenvolgorde van het DNA te bepalen.

De numerieke taxonomie gaat er van uit dat we, om aan de kennisgeladenheid van de waarneming te ontsnappen, niet op voorhand uitspraken moeten doen over de eigenschappen die taxonomisch van belang zijn. In plaats daarvan moeten we van een verzameling soorten zoveel mogelijk eigenschappen meten. Daarna kunnen we dan vaststellen hoeveel eigenschappen de verschillende soorten gemeenschappelijk hebben. De aanname is dan dat de verwantschap groter is naarmate meer eigenschappen overeenstemmen. De werkwijze van de numerieke taxonomie wordt

vaak geïllustreerd met de zogenaamde caminalculen. Leerlingen kunnen met deze fantasiebeetjes een stamboom opstellen (Gendron, 2000) (zie box 4).

Box 4 : Caminalculen



Groepsopdracht (4 of 5 leerlingen):
Maak een stamboom van alle caminalculen.

Werkwijze:

- 1) Verdeel de caminalculen over de groepsleden.
- 2) Onderscheidt zo veel mogelijk verschillende typen kop, ogen, lijf en ledematen en geef ze nummers en een naam. Per type kun je ook verschillende subtypen onderscheiden.
- 3) Leg voor ieder exemplaar vast over welke type kop, ogen, lijf en ledematen het beschikt.
- 4) Zet alle caminalculen in een matrix. Bepaal voor ieder soort welke eigenschappen het met ieder ander soort gemeen heeft. Noteer het aantal gemeenschappelijke eigenschappen in de matrix.
- 5) Knip de caminalculen uit en leg ze in groepen die één of meer eigenschappen gemeenschappelijke hebben bij elkaar. Leg de soorten die de meeste eigenschappen gemeenschappelijke hebben naast elkaar. Rangschik de andere soorten daaromheen, zodanig dat soorten met gemeenschappelijke eigenschappen bij elkaar liggen.
- 6) Teken de stamboom op een groot vel papier, waarbij soorten die minder gemeenschappelijke eigenschappen hebben lager in de stamboom met elkaar worden verbonden. Plak de afbeeldingen in de stamboom.

Het tweede alternatief voor een vergelijkend morfologische benadering is om van twee soorten de basenvolgorde van het DNA met elkaar te vergelijken. In dat geval is de aanname dat naarmate de basenvolgorde minder verschilt, de verwantschap groter is.

We kunnen verwachten dat de verschillende methoden om de verwantschap van soorten te bepalen tot een verschillend resultaat kunnen leiden. Dat is ook herhaaldelijk vastgesteld. Zo blijkt bijvoorbeeld de pelikaan helemaal niet tot de pelikaanachtigen te behoren (Van Tuinen, 2001) en woedt er een discussie over de

vraag hoe de verwantschap tussen dolfijnen, potvissen en baleinwalvissen moet worden afgebeeld (Van Moorsel & Scholdhuizen, 1999).

De wijze waarop we ons stamboom tekenen, op basis van morfologische vergelijking, volgens een numeriek taxonomische benadering of door bepaling van de basenvolgorde, is dus van grote invloed op de stamboom die we uiteindelijk construeren. De onderzoeksmethode bepaalt dus in sterke mate wat we vinden.

In die gevallen dat we resultaten van verschillende methoden om stambomen samen te stellen met elkaar kunnen vergelijken, willen we natuurlijk de vraag beantwoorden aan welke resultaat we het meeste waarde moeten toekennen. Die vraag is in de meeste gevallen niet goed te beantwoorden. Alle drie de methoden om verwantschap te bepalen en stambomen op te stellen berusten op specifieke aannamen. Een vergelijkend morfologische benadering gaat er van uit dat overeenkomst in vorm en structuur iets zegt over verwantschap en dat er geen sprake is van parallelle evolutie. Met een numeriek-taxonomische benadering lopen we het risico dat we zonder dat we het weten onze conclusies over verwantschap mede baseren op kenmerken die niet adaptief zijn. Als we kiezen voor een moleculaire benadering en uitspraken over verwantschap baseren op overeenkomst in basenparen, gaan we er van uit dat de verwantschap groter is naarmate de verschillen in basenparen kleiner zijn. Een moleculaire benadering leidt tot de conclusie te leiden dat parallelle evolutie veelvuldig moet zijn opgetreden.

Bovenstaande beschouwing over stambomen laat zien dat de onderzoeksmethode die we voor de constructie van een stamboom kiezen bepalend is het resultaat. Daarbij is het van belang dat leerlingen zich realiseren dat een nieuwe onderzoeksmethode pas kan worden ontwikkeld als de technologie daarvoor beschikbaar is. De numerieke taxonomie ontstond op het moment dat met computers statistische bewerkingen met grote aantallen gegevens konden worden uitgevoerd. En onderzoek naar de in DNA voorkomende basenparen was pas mogelijk toen de elektroforese voldoende was ontwikkeld.

Box 5: Evolutietheorie

De door iedereen aanvaarde verklaring voor evolutie is dat *natuurlijke selectie* kan leiden tot *reproductieve* en eventueel *geografische isolatie*, waardoor nieuwe soorten kunnen ontstaan. In kleine populaties kunnen snelle veranderingen ontstaan doordat, als gevolg van het toeval, een groter of kleiner aantal genen uit de populatie verdwijnen (*genetic drift*). De variabiliteit in de populatie wordt in stand gehouden door *mutaties* die bij toeval kunnen ontstaan. Herhaaldelijk is er op gewezen dat het niet erg aannemelijk is dat puntmutaties (mutaties in één basepaar van het DNA) tot het ontstaan van nieuwe soorten kunnen leiden. Als verklaring voor het ontstaan van hogere taxonomische eenheden is gewezen op het belang van mutaties van de genen die groepen genen aansturen, waarbij ook onbenutte delen van de chromosomen kunnen worden ingeschakeld (Augros & Stanciu, 1989). Overigens kan ook vertraging van het moment waarop genen in de ontogenie tot expressie er toe leiden dat weinig gespecificeerde soorten ontstaan met een sterk adaptief vermogen.

Naast deze populatiegenetische mechanismen spelen volgens sommige auteurs ook andere mechanismen een rol. Naast de hierboven genoemde mechanismen worden met name onderstaande verklaringen voor evolutie aangevoerd.

Niet-adaptieve evolutie – Het idee dat onbenutte delen van chromosomen (het ‘junk-

DNA) van invloed zijn wordt uitgewerkt in de zgn. neutrale theorie van de moleculaire evolutie (Kimura, 1983; Dover, 2000). Als het gedeelte van het DNA, dat geen invloed heeft op het voortplantingssucces, zich door de populatie verspreidt, kan het onder gewijzigde omstandigheden tot expressie komen en kan een nieuwe functie ontstaan. De theorie sluit aan bij de redenering van Gould & Lewontin (1978) dat nieuwe functies kunnen ontstaan uit oorspronkelijk niet-adaptieve vormen of structuren.

Co-evolutie – Veel auteurs (bijv. Wilson, 1994) hebben er op gewezen dat soorten, doordat zij binnen ecosystemen specifieke relaties met elkaar onderhouden, niet onafhankelijk van elkaar kunnen evolueren. Als gevolg daarvan kan een wapenwedloop tussen soorten ontstaan. Veranderingen van de ene soort betekent dat een andere soort niet meer optimaal is aangepast. Als het tweede soort zich aan de gewijzigde omstandigheden aanpast, is het eerste soort weer ‘gedwongen’ zich aan het tweede soort aan te passen; enzovoort.

Catastrofes - Door verschillende auteurs is er op gewezen dat in de loop van de aardgeschiedenis niet alleen nieuwe soorten zijn ontstaan, maar dat het merendeel van de soorten de hebben geleefd inmiddels ook is uitgestorven. Nieuwe soorten kunnen ontstaan als niches die door oude soorten werden bezet vrijkomen. Dat zou met name kunnen gebeuren als in een relatief korte perioden veel soorten uitsterven (zie bijv. Wilson, 1994). Dergelijke catastrofes moeten zijn ontstaan door relatief snelle verandering van klimaat of leefomstandigheden, waardoor met name sterk gespecialiseerde soorten zich niet meer konden aanpassen. Als oorzaken voor snelle veranderingen van klimaat en leefomstandigheden zijn voorgesteld wisselingen in de intensiteit van de straling van de zon (leidend tot ijstijden), langdurige en heftige vulkaanuitbarstingen zoals aan het einde van het Perm, of inslag van meteorieten, waarmee een einde werd gemaakt aan het Krijt (Alvarez, 1998). We moeten dus af van het idee dat evolutie alleen maar langzaam en in kleine stapjes verloopt. Gould (1990) heeft laten zien dat alle phyla die nu voorkomen al in het Cambrium aanwezig waren. In de aardgeschiedenis is dus sprake van perioden met snelle evolutie, afgewisseld met perioden met langzame evolutie, of zelfs stilstand, en uitsterven.

Zelforganisatie – De afgelopen jaren zijn door een aantal onderzoekers simulaties uitgevoerd waarmee onder meer het ontstaan van het leven en van het genoom is nagebootst. Op grond daarvan concluderen zij dat dergelijke sprongen in de evolutie, in de complexiteit van het leven door zelforganisatie kunnen zijn ontstaan (Kauffman, 1996, 2000; Lewin, 1993). Bij verklaring van complexiteit maken deze auteurs gebruik van chaostheorie die stelt dat uit systemen die in een chaotische situatie verkeren spontaan nieuwe structuren kunnen ontstaan (Prigogine & Stengers, 1985; Jantsch, 1980).

]

Literatuur

- Alvarez, W. (1998). *T.Rex en de krater des doods*. Amsterdam: Wereldbibliotheek.
Augros, R. & Stanciu, G. (1989). *De nieuwe biologie. Doorbraak in de wetenschap van het leven*. Rotterdam: Lemniscaat b.v.

- Cobern, W.W. (2000). *Everyday Thoughts about Nature*. Dordrecht, London, Boston: Kluwer Academic Publishers.
- Dagher, Z.R. & BouJaoude, S. (1997). Scientific Views and Religious beliefs of College Students: The Case of Biological Evolution. *Journal of Research in Science Teaching* 34(5), 429-445.
- Darwin, C. (1839)(1993). *De reis van de Beagle*. Amsterdam/Antwerpen: Uitgeverij Atlas.
- Darwin, C. (1859)(1968). *The Origin of Species by means of Natural Selection*. London: Penguin Books.
- Dennett, D.C. (1995). *Darwin's Dangerous Idea. Evolution and the meanings of life*. London: Penguin Books.
- Dover, D. (2000). Anti-Dawkins. In: Rose, H. & Rose, S. (eds.). *Alas, Poor Darwin. Arguments Against Evolutionary Psychology*. London: Jonathan Cape. pp.47-66.
- Gendron, R.P. (2000). The Classification & Evolution of Caminalcules. *The American Biology Teacher*, 62(8), 570-576.
- Gould, S.J. (1990). *Wonderful life*. London: Penguin Books.
- Gould, S.J. (1991). *Bully for Brontosaurus*. London: Penguin Books
- Hendrikse, M. (1998). *Leerlingdenkbeelden over soortsvorming. Een vakdidactisch onderzoek aan de hand van het lespakket 'Evolutie' in de bovenbouw van het voortgezet onderwijs*. Utrecht: Didactiek van de biologie.
- Hendrikse, M. & Boersma, K.Th. (1999). Leerlingdenkbeelden over soortsvorming. *Tijdschrift Didactiek der β -wetenschappen* 16(2), 110-129.
- Jantsch, E. (1980). *The Self-organizing Universe. Scientific and Human Implications of the Emerging Paradigm of Evolution*. Oxford/New York: Pergamon Press.
- Kauffman, S. (1996). *Eieren, straalmotoren en paddestoelen. Zelforganisatie als verborgen sleutel tot evolutie*. Amsterdam/Antwerpen: Uitgeverij Contact.
- Kauffman, S. (2000). *Investigations*. New York: Oxford University Press.
- Lewin, R. (1993). *Complexiteit. Het grensgebied van de chaos*. Amsterdam/Antwerpen: Uitgeverij Contact.
- Mayr, E. (1997). *This is biology*. Cambridge (Mass.): Harvard University Press.
- Moore, R. (1999). Creationism in the United States. VIII. The Lingering Threat. *The American Biology Teacher* 61(5), 330-339.
- Moorsel, C.van & Schilthuizen, M.(1999). Een levensboom. In Van Strien (red.). *Evolutie betrapt. Onderzoekers in het spoor van Darwin*. Utrecht: KNNV Uitgeverij. pp.136-147.
- Prigogine, I. & Stengers, I. (1985). *Orde uit chaos. De nieuwe dialoog tussen de mens en de natuur*. Amsterdam: Uitgeverij Bert Bakker.
- Smeenk, Z. (1983). Devonian trilobites of the Southern Cantabrian Mountains (Northern Spain). *Leidse Geologische Mededelingen* 52, 383-511.
- Tuinen, M.van (2001). Schudden aan de vogelstamboom. Een moleculaire kijk op vogelevolutie. *Natuur & Techniek* 69(2), 32-37.
- Wells, J. (1999). Haeckel's Embryos & Evolution. *The American Biology Teacher*, 61(5), 345-349.
- Wilson, E.O. (1994). *Het veelvormige leven*. Amsterdam/Antwerpen. Uitgeverij Contact.