

De evolutiebioloog als detective

Bart Klink

September 2006

Veel mensen hebben grote moeite om zich voor te stellen dat het leven zoals we het nu kennen het product is van ruim 3,5 miljard jaar evolutie. Vele dieren die we nu kennen hebben voor veruit het grootste deel van de aardgeschiedenis niet bestaan, en vele dieren die ooit bestaan hebben, kennen we nu niet meer. Ze zijn geëvolueerd uit andere soorten, die ook weer uit andere geëvolueerd zijn, wat uiteindelijk teruggaat tot de gemeenschappelijke voorouder van al het leven. Door middel van dit artikel wil ik laten zien waarom evolutiebiologen denken dat evolutie heeft plaatsgevonden, zelfs dat het een geaccepteerd feit is. Hun aanpak blijkt erg veel te lijken op die van een detective.

Het is niet vreemd dat veel mensen hier grote moeite mee hebben. Ik denk dat hiervoor, naast religieuze redenen, drie voornaamste redenen bestaan. De eerste is de tijdspanne, de tweede de manier waarop wij dieren indelen in groepen en de derde reden is dat grote evolutionaire veranderingen niet direct waargenomen kunnen worden.

Mensen zijn gewend te denken in uren, dagen, jaren en soms eeuwen of millennia. Dit is ook logisch omdat ze zelf maar enkele tientallen jaren leven en de algemeen bekende geschiedenis van de mensheid niet verder teruggaat dan een paar millennia. Grote evolutionaire veranderingen, zoals de verandering van een vin in een poot of een poot in een vleugel, zijn vaak pas zichtbaar als je het bekijkt over miljoenen jaren. Dat neemt uiteraard niet weg dat evolutie ook in kortere tijdsspannen plaatsvindt (het leven evolueert constant), maar deze veranderingen zijn relatief klein en onopvallend, zeker voor een lekenoog.

De tweede reden is dat mensen gewend zijn om de wereld op te delen in hokjes, zo ook de levende natuur. We spreken over een paard, een vis of een mens, alsof elk dier ondergebracht kan worden in dergelijke groepen. Een dier dat bijvoorbeeld zowel eigenschappen van een vis als een viervoeter heeft, kunnen we daarom niet onderbrengen, we hebben er ook geen (dagelijks) woord voor. Toch zal degene die iets van evolutie wil begrijpen over die hokjes heen moeten stappen. Er hebben namelijk dieren geleefd die bijvoorbeeld inderdaad zowel vis- als van viervoetereigenschappen hadden (hier wordt later nog op teruggekomen). De bovengenoemde voorbeelden van hokjes zijn menselijke constructies en ook onmisbaar voor goede communicatie, als maar niet vergeten wordt dat ze in de natuur niet bestaan.

De derde reden is dat evolutie op grote schaal niet direct waargenomen kan worden. Je kunt bijvoorbeeld niet in een aantal jaren zien hoe een vin een poot wordt. Dergelijke veranderingen vergen veel meer tijd dan een mensenleven. Sommige mensen, creationisten in het bijzonder, verwachten als bewijs voor evolutie dat in zeer korte tijd een compleet ander dier evolueert. Ironisch genoeg zou dit voor evolutiebiologen juist een weerlegging zijn, omdat de mechanismen achter evolutie dit soort extreem grote

veranderingen in zo'n korte tijd onmogelijk maken. Een vin wordt geen poot in een paar generaties, laat staan van de ene generatie op de andere!

Maakt het feit dat evolutie op grote schaal niet direct waargenomen kan worden het onmogelijk om te zeggen *of* en *hoe* het gebeurd is? Is het niet onmogelijk om wetenschap te bedrijven zonder *directe* waarneming, in het hier en nu? Absoluut niet. Er bestaat namelijk nog een andere vorm van waarneming: *indirecte*. Alle historische wetenschappen werken hiermee, niet alleen de evolutiebiologie, maar ook de kosmologie, geologie, archeologie en geschiedkunde. Bij indirecte waarneming wordt gezocht naar *aanwijzingen* (*evidence* in het Engels) die te vinden zouden moeten zijn op grond van de hypothese of theorie. Misschien is dit het beste te vergelijken met een detective die bijvoorbeeld een moordzaak moet oplossen.

De evolutiebioloog als detective

Een detective zal zelden of nooit een moordenaar via directe waarneming (op heterdaad) een moord zien plegen, net als dat een evolutiebioloog nooit evolutie op grote schaal direct zal waarnemen. Betekent dit dat een detective nooit een moordzaak kan oplossen? Natuurlijk niet, er zitten immers genoeg moordenaars (op goede gronden) achter de tralies. Vergelijkbaar zijn ook evolutiebiologen behoorlijk goed in staat de geschiedenis van het leven te onderzoeken en daaruit bepaalde conclusies te trekken. Zowel de detective als de evolutiebioloog doen dit door naar de eerder genoemde aanwijzingen te zoeken. Deze aanwijzingen zijn niet altijd even groot of duidelijk, maar ze zijn er meestal wel.

Wanneer een detective op de plaats van de moord komt, stelt hij een 'hypothese' op over wat er gebeurd is. Vervolgens gaat hij zoeken naar aanwijzingen (sporen) die zijn 'hypothese' ondersteunen of weerleggen. Dit soort aanwijzingen kunnen voor de detective bijvoorbeeld vingerafdrukken, voetsporen, manier van moord, DNA-materiaal of een signalement zijn. Aan de hand van dit soort aanwijzingen is de detective vaak in staat te *reconstrueren* wat er is gebeurd en *hoe* dat is gegaan.

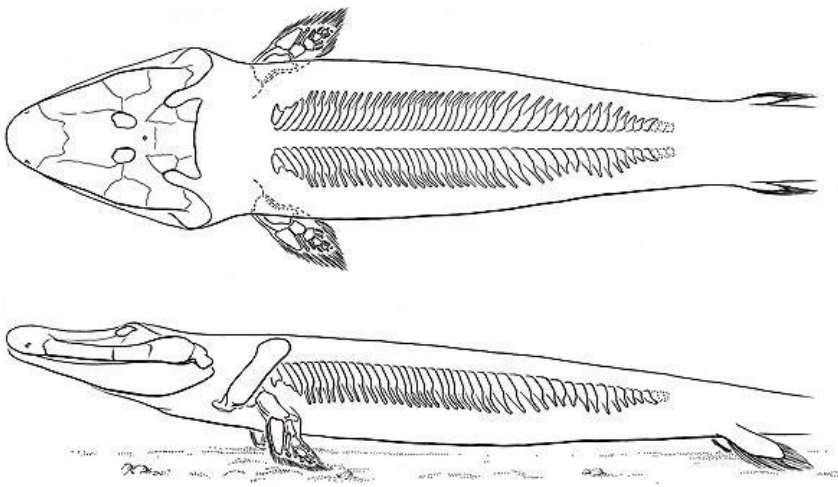
Een evolutiebioloog doet iets vergelijkbaars als hij onderzoekt hoe het leven zich heeft ontwikkeld, ook hij probeert een reconstructie te maken. Hij stelt bijvoorbeeld de hypothese op dat het ene dier nauw verwant is aan het andere. Vervolgens gaat hij op zoek naar aanwijzingen om dat te ondersteunen of te weerleggen. Er is een aantal soorten aanwijzingen dat hij kan gebruiken: fossielen, overeenkomsten in lichaamsstructuren, rudimentaire organen, overeenkomsten in DNA, overeenkomsten in embryologische ontwikkeling en verspreiding over de aarde (biogeografie). Hieronder zullen deze aanwijzingen stuk voor stuk besproken worden.

Aanwijzingen voor evolutie op grote schaal

De meest bekende aanwijzingen zijn waarschijnlijk *fossielen*, de versteende resten of afdrukken van organismen die in het verleden leefden. Helaas zijn lang niet alle dieren die in het verleden leefden gefossiliseerd, omdat fossilisatie een zeldzaam proces is (het gebeurt alleen onder zeer bijzondere omstandigheden). Ook is het zo dat vele fossielen verwoest zijn door allerlei geologische processen. Tot slot is nog maar een relatief klein

deel van de aardkorst doorzocht en zitten er nog vele fossielen in de grond. Omdat overal ter wereld wetenschappers blijven zoeken, worden er regelmatig nieuwe fossielen gevonden. Ondanks deze gebrektheid zijn er vele fossielen bekend. Hierdoor vormen fossielen een belangrijke bron van aanwijzingen voor evolutiebiologen, die de geschiedenis van het leven op aarde willen reconstrueren.

Als evolutie waar is, en al het leven dus via gemeenschappelijke voorouders met elkaar verbonden is, zouden er vele fossielen moeten zijn om die verschillende organismen met elkaar te verbinden. Deze fossielen zijn er ook en blijven boven de grond komen door het werk van *paleontologen* (fossieldeskundigen). Zo zijn er bijvoorbeeld meerdere fossielen gevonden die de overgang van landzoogdieren (viervoeters) naar de walvisachtigen (waartoe ook dolfijnen behoren) laten zien. Ook de evolutie van de mens is goed gedocumenteerd in het fossielenbestand.



Een ander mooi voorbeeld is de eerder aangehaalde overgang van vis naar viervoeter. Dit lijkt misschien een onmogelijke stap, maar er zijn vele fossiele tussenvormen gevonden die een mengeling vertonen van vis en

Figuur 1 De reconstructie van een echte overgangsvorm (*Tiktaalik roseae*).

viervoetereigenschappen. De meest recente vondst is *Tiktaalik roseae*, de ‘visvoeter’ (figuur 1), met onder andere kieuwen en schubben als een vis, maar ook de ribben, beweegbare nek en longen van een viervoeter. De voorste ledematen zelf vertonen tevens een mengeling van vin- en pootkenmerken. Uit de omgeving waarin het fossiel gevonden is en de eigenschappen van het fossiel zelf, blijkt dat het geleefd heeft op de bodem van ondiep water en misschien zelfs voor korte tijden op het land

Het is niet alleen zo dat er fossiele overgangsvormen *zijn*, ze vormen ook nog eens de mengeling van kenmerken die je zou *verwachten* op grond van gemeenschappelijke afstamming. Wie zich een vertakkende boom voorstelt, ziet direct in dat niet alle takken met elkaar verbonden zijn, maar slechts de

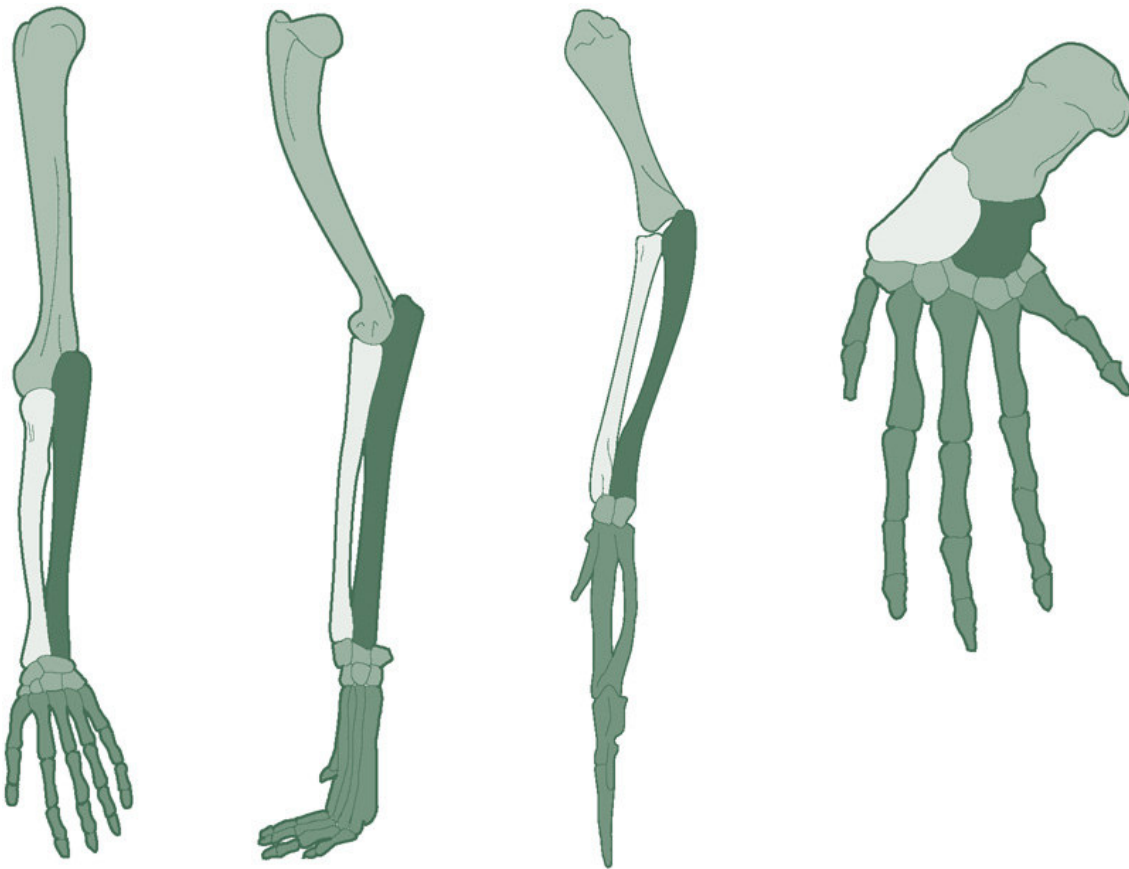


Figuur 2 Een denkbeeldige overgangsvorm (centaur), die nooit bestaan heeft. Zie tekst voor verder uitleg.

takken die uit elkaar voortkomen. Met andere woorden: een overgangsvorm is niet een *willekeurige* mengeling. Er zijn talloze voorbeelden denkbaar van ‘overgangsvormen’ (mengelingen), zoals de sfinx (leeuw en vrouw) of centaur (paardmens, figuur 2), maar die treffen we nooit aan. De reden daarvoor is simpel: de evolutionaire takken van leeuwen, paarden en mensen zijn niet direct met elkaar verbonden.

Belangrijk bij fossielen is ook de ouderdom, die wordt bepaald met allerlei verschillende en onafhankelijke technieken. Op grond van evolutie is namelijk een bepaald patroon te verwachten in de tijd: een vertakkende boom, waarbij de ene tak vaak de oorsprong is van andere takken. Zo zijn de viervoeters bijvoorbeeld ontstaan uit een aftakking van een bepaalde groep vissen. Dit idee zou gemakkelijk weerlegd kunnen worden als er bijvoorbeeld een viervoeter gevonden zou worden die ouder is dan de groep vissen waarvan hij afgesplitst zou zijn. Dit is echter niet het geval. De overgangsvormen van vissen naar viervoeters hebben de ouderdom die te verwachten is op grond van evolutie.

Een andere vorm van aanwijzingen zijn de overeenkomsten in lichaamsstructuren, die *homologieën* worden genoemd. Wie wel eens naar de botten van andere dieren heeft gekeken, is het misschien opgevallen dat er grote overeenkomsten bestaan, hoewel er natuurlijk ook onderlinge verschillen zijn in grootte en vorm. Als we de menselijke arm



Figuur 3 Homologieën tussen verschillende diersoorten (v.l.n.r.: mens, hond, vogel en walvis). De overeenkomstige botten hebben dezelfde kleuren.

als voorbeeld nemen, blijkt bijvoorbeeld dat dezelfde botstructuren voorkomen in de poten of armen van andere dieren. Ook een hond, walvis of vogel heeft een opperarmbeen, een spaakbeen en een ellepijp en botjes die vergelijkbaar zijn met die in onze handen zitten (figuur 3). Men zegt dan dat bijvoorbeeld het opperarmbeen van de mens homoloog is aan het opperarmbeen van een hond.

Wat belangrijk is om hierbij op te merken is dat deze op elkaar lijkende lichaamsstructuren alle vier een totaal andere functie hebben (respectievelijk manipulatie, lopen/ondersteunen, vliegen en zwemmen). De overeenkomsten kunnen dus niet ontstaan zijn door overeenkomsten in functie. Wanneer er sprake is van een functionele overeenkomst, zonder dat daar een overeenkomst in structuur aan ten grondslag ligt, spreekt men van *analogieën*. Voorbeelden daarvan zijn de vleugel van een vlinder (insect), duif (vogel) of vleermuis (zoogdier), die qua structuur alleen oppervlakkig op elkaar lijken.

Als evolutie waar is, is te verwachten dat de lichaamsstructuren van de dieren die recent een gemeenschappelijke voorouder hebben gedeeld, meer op elkaar lijken dan die van de dieren die verder in het verleden een gemeenschappelijke voorouder hebben gehad. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn. De arm van de chimpansee, onze naaste evolutionaire verwant, heeft nagenoeg dezelfde botten en spieren als de onze. Meer verschillen bestaan er al met bijvoorbeeld de voorpoot van een rat, en nog meer met de voorpoot van een krokodil. Naarmate we verder teruggaan in de tijd, worden de overeenkomsten steeds kleiner.

Rudimenten vormen ook een bekende aanwijzing voor evolutie. Een rudiment is een restant van een structuur die goed ontwikkeld is in een ander organisme, maar geen of een andere functie heeft dan de goed ontwikkelde homoloog. In tegenstelling tot wat vaak gedacht wordt, hoeft een rudiment dus niet functieloos te zijn. Drie klassieke voorbeelden van rudimenten zijn het menselijk staartbeentje, het wormvormig aanhangsel en kippenvel.

Op de plek waar bij de meeste andere zoogdieren (onder andere mensapen, inclusief de mens, vormen een uitzondering) de staart begint, zit bij de mens een aantal kleine werveltjes dat vaak vergroeid is. Deze 3 tot 5 werveltjes worden gezamenlijk het staart- of stuitbeentje genoemd. Ze hebben in meer of mindere mate de kenmerken die de staartwervels van dieren met een staart ook hebben. Er hechten zelfs spieren op aan die dieren met een staart gebruiken om de staart te bewegen. Deze wervels, inclusief hun anatomische kenmerken, zijn homoloog aan de staartwervels van dieren met een staart, alleen hebben ze bij ons niet meer dezelfde functie als bij deze dieren. Ons staartbeentje is dus rudimentair.

Een ander rudimentair orgaan is ons wormvormig aanhangsel. Dit kleine orgaantje bevindt zich aan het eind van de blinde darm en is dus wat anders dan de blinde darm zelf. De blinde darm, waar het wormvormig aanhangsel een verlengde van is, is een orgaan dat gespecialiseerd is in het afbreken van plantenmateriaal. Over het algemeen geldt dan ook dat hoe meer plantenmateriaal een dier eet, des te langer zijn blinde darm

is. De blinde darm bevat speciale bacteriën die het mogelijk maken om cellulose (een veelvoorkomende plantmolecule) af te breken. Zonder deze bacteriën is het niet mogelijk om cellulose af te breken, zoals dat bij mensen het geval is. De menselijke appendix is homoloog aan het eind van de blinde darm van zoogdieren.

Bij ons heeft het deze functie verloren waardoor het rudimentair is. Het levert misschien nog een kleine bijdrage aan het immuunsysteem. Wat een nare bijkomstigheid is, is dat het kan gaan onsteken, wat *appendicitis* wordt genoemd (in de volksmond meestal (onterecht dus) blindedarmontsteking genoemd). Deze ontsteking komt meestal voor bij kinderen tussen de 8 en 13 jaar en kan zelfs tot de dood leiden. Zo'n ontstoken aanhangsel wordt dan verwijderd, wat verder geen enkel schadelijk effect heeft. Ook komt het voor dat het wormvormig aanhangsel al bij de geboorte niet aanwezig is. Dit levert ook geen enkel nadeel op. Er is dus geen enkele reden om aan te nemen dat dit kleine rudimentaire orgaan een noemenswaardige functie heeft bij de mens.

Niet alle rudimenten zijn anatomisch (zoals de hierboven genoemde twee), sommigen zijn fysiologische. Iedereen is wel bekend met het fenomeen kippenvel. Het ontstaat bij kou of schrik en wordt veroorzaakt doordat kleine spiertjes aan de haren trekken. Bij dieren die een (dik) pak haar hebben, heeft het kippenvel een belangrijke functie. Doordat de haren overeind gaan staan, komt er meer lucht in de vacht waardoor deze beter isoleert. Ook lijkt een dier met opgezette haren groter, waardoor het meer indruk kan maken op zijn vijanden. Maar welke haren moeten dan overeind gaan staan bij de mens? Ook onze huid is nog bedekt met heel veel haar, alleen zijn deze haartjes zo klein dat je ze op de meeste plekken niet ziet. We scheren ze soms zelfs weg, wat aangeeft dat we ze niet meer nodig hebben. Zowel onze 'vacht' als het overeind zetten van die 'vacht' (kippenvel) zijn bij ons rudimentair.

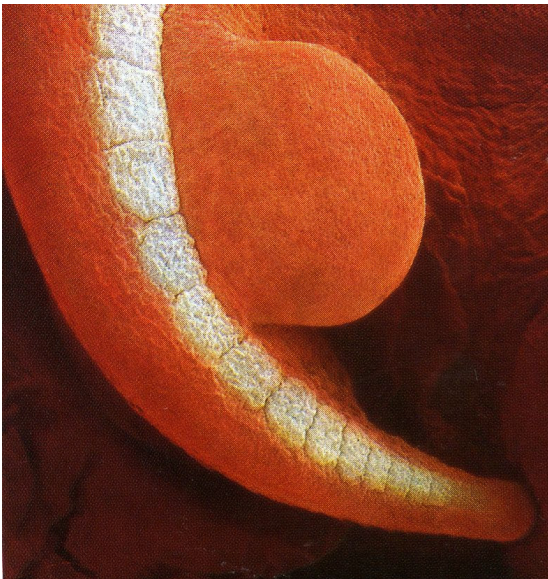
Een andere aanwijzing is te vinden in het DNA. DNA is het recept om een organisme te maken. Bij veel organismen (en bij bijna alle dieren) bestaat het DNA uit een combinatie van het DNA van de moeder en de vader. Het DNA maakt overerving van eigenschappen mogelijk. Er zijn verschillende mechanismen die er voor zorgen dat het DNA van het nageslacht net iets anders is dan dat van de ouders, waardoor er variatie ontstaat. Voor Darwin waren deze mechanismen nog een groot raadsel, wat hij als een groot probleem voor zijn theorie beschouwde. Deze mechanismen zorgen ervoor dat jouw DNA meer overeenkomsten vertoont met dat van je eventuele broers of zussen dan met dat van je neven en nichten. Je neven en nichten lijken genetische weer meer op jou dan je achterneven en -nichten. Op deze manier kan een afstammingsboom worden gereconstrueerd van jouw familie. In het algemeen blijkt dat naaste verwanten meer overeenkomsten in het DNA vertonen dan verre verwanten. Hoe verder in het verleden de gemeenschappelijke voorouder leefde, hoe meer variatie er sinds die tijd kan ontstaan.

Het blijkt dat alle organismen op aarde DNA gebruiken voor erfelijkheid. Alleen dit is al een aanwijzing dat alle dieren uiteindelijk een gemeenschappelijke voorouder delen. Als dit niet zo was, hadden ze immers net zo goed een andere erfelijkheidsdrager kunnen hebben dan DNA. Door het DNA van allerlei verschillende dieren in kaart te brengen, is het mogelijk ze met elkaar te vergelijken.

Wanneer we hetzelfde principe hanteren als bij het reconstrueren van onze eigen familieboom, is het ook mogelijk aan de hand van het DNA een familieboom van alle organismen te reconstrueren. Het is zelfs mogelijk om met de snelheid waarmee het DNA verandert per generatie na te gaan wanneer de gemeenschappelijke voorouders ongeveer geleefd moeten hebben. Het is dus niet alleen mogelijk om te bepalen *wie met wie* een gemeenschappelijke voorouder heeft gehad, maar ook *wanneer* die gemeenschappelijke voorouder ongeveer geleefd moet hebben.

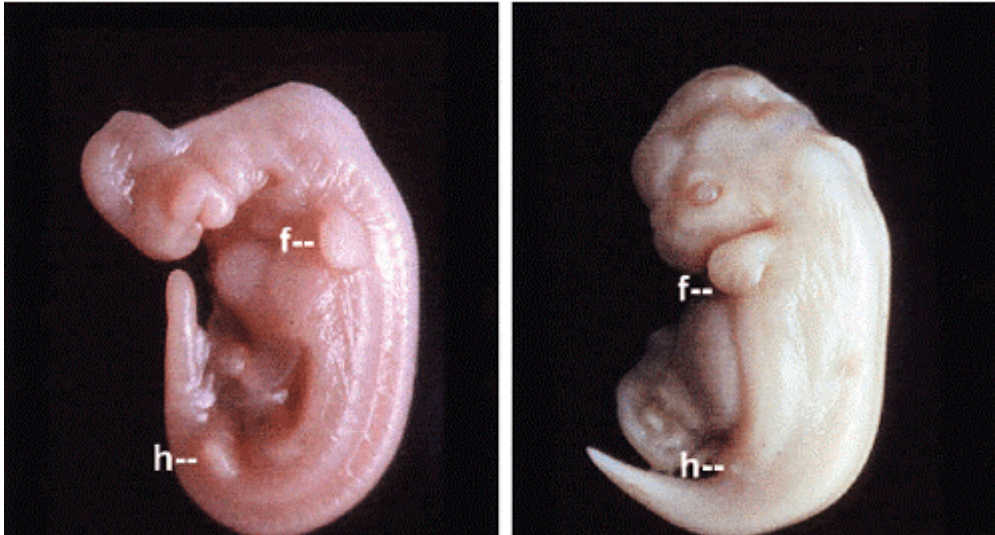
Darwin zelf merkte al op dat *embryo's overeenkomsten vertonen*. Ernst Haeckel, een vroege verdediger van Darwins evolutietheorie, heeft dit verder gepopulariseerd met zijn inmiddels beroemde tekeningen. Hij ging zelfs zo ver dat hij meende dat de organismen tijdens hun embryonale ontwikkeling hun evolutionaire (fylogenetische) geschiedenis herhaalden. Dit idee is bekend geworden onder de recapitulatietheorie. Zijn tekeningen bleken echter deels niet te kloppen. Het is ook onjuist gebleken dat een ontwikkelend embryo alle stadia van zijn evolutionaire geschiedenis doorloopt. Voor sommigen is dit reden geweest om het hele idee van embryonale gelijkenissen overboord te gooien. Dit is echter onterecht.

Die gelijkenissen zijn er namelijk wel degelijk. Een mooi voorbeeld daarvan is de chorda dorsalis. Dit is een soepele staaf die de lichaams-as vormt in embryo's en bij sommige dieren de rest van het leven. Bij een groot aantal fossiele en sommige recente vissen, die geen wervellichamen bezitten (steuren, prikken), vormt de chorda gedurende het gehele leven een belangrijk element van de lichaams-as en speelt zij een grote rol bij de voortbeweging. Bij de overige gewervelde dieren (ook bij de mens) wordt zij later door de wervellichamen vervangen en verdwijnt dan vrijwel geheel. Alleen bij zoogdieren kunnen vrij belangrijke resten in de vorm van een onderdeel van de tussenwervelschijven overblijven.



Een ander mooi voorbeeld is de embryonale staart (figuur 4). Dit is een kenmerk van alle gewervelde dieren, ook van de dieren die geen staart hebben als ze geboren zijn. Dit is ook bij de mens het geval. De menselijke staart wordt aangelegd, bereikt zijn maximale lengte en wordt vervolgens weer afgebroken. Nog een ander voorbeeld zijn de poten van een slang en de achterpoten van een walvis die, net als bij de embryo's van andere vierpotigen, eerst worden ontwikkeld om vervolgens weer afgebroken te worden (figuur 5).

Figuur 4 De ontwikkelende staart is goed te zien, hij reikt ruim verder dan de ontwikkelende benen (oranje ronding).



Figuur 5 Een embryo van een dolfin na 24 dagen (links) en 48 dagen (rechts) zwangerschap. Let op de ontwikkelende achterpoten (h) die na 24 dagen duidelijk zichtbaar zijn, maar na 48 dagen al weer zo goed als weg zijn.

Biogeografie is de manier waarop organismen over de aarde verdeeld zijn. Ook hier blijkt een bepaald patroon in te zitten, de verdeling is niet willekeurig. Dit was ook Charles Darwin al opgevallen toen hij de vinken op de Galapagos eilanden bestudeerde. Hij vroeg zich af wat dit patroon kon verklaren. Hij schreef dit toe aan gemeenschappelijke afstamming (daardoor leken de vinken op elkaar) waarop natuurlijke selectie had ingewerkt (daardoor waren de verschillende vinken aangepast aan de verschillende leefomstandigheden).

Iets vergelijkbaars is ook op grote schaal waarneembaar. Fossielen blijken namelijk tevens een dergelijk patroon te vormen. Zo is bijvoorbeeld te verwachten dat als de mens nauw verwant is aan de Afrikaanse mensapen, zijn voorouders in de buurt van de voorouders van de Afrikaanse mensapen geleefd moeten hebben. Dit blijkt inderdaad het geval te zijn: de fossielen van de eerste mensachtigen komen allemaal uit Afrika. Stel nou dat de fossielen van de eerste mensachtigen uitsluitend gevonden worden in Noord- of Zuid-Amerika. Dit ligt vele kilometers af van het Afrikaanse continent en er zit een gigantische zee tussen. Dit zou een groot probleem vormen voor de gemeenschappelijke afstamming van de mens en de andere Afrikaanse mensapen. Het biogeografische patroon is echter precies wat te verwachten is op grond van evolutie: hoe dichter soorten aan elkaar verwant zijn, hoe dichter ze (of hun fossiele voorouders) bij elkaar voorkomen.

De conclusie

Een goede detective gaat niet op een enkele aanwijzing af, maar verzamelt er het liefst zoveel mogelijk. Als zijn hypothese klopt, moeten alle aanwijzingen immers unaniem in dezelfde richting wijzen. Zo gaat ook de evolutiebioloog niet op een enkele aanwijzing af. We hebben hierboven gezien, en dat zijn slechts enkele voorbeelden, dat er meerdere lijnen van aanwijzingen zijn waarop hij zijn conclusies baseert. Als alle mogelijke

aanwijzingen te berde worden gebracht, blijkt de algemene conclusie onvermijdelijk: evolutie, ook op grote schaal, is een feit.

De verklarende kracht van evolutie is niet alleen dat alle aanwijzingen er naar wijzen, maar tevens dat er vele aanwijzingen denkbaar zijn die het kunnen *ontkrachten* (weerleggen, falsificeren). Fossielen *kunnen* op de ‘verkeerde plaats’ zitten in zowel tijd als ruimte, een embryo van een mens *kan* meer op dat van een vis lijken dan dat van een ander zoogdier. De mens zou een andere vorm van overerving *kunnen* hebben dan de andere dieren. De mens zou organen *kunnen* hebben die niet in andere dieren voorkomen, het vaststellen van homologieën zou onmogelijk *kunnen* zijn. Dit zijn allemaal voorbeelden die evolutie zouden weerleggen, of op z’n minst in grote problemen zouden brengen.

Hierin verschilt de evolutiebiologie (en wetenschap in het algemeen) van religie. Natuurlijk kan iemand zeggen dat al de hierboven aangehaalde aanwijzingen net zo goed verklaard kunnen worden door een almachtige god. Dit is een populaire tactiek van creationisten, die onder de conclusie uit proberen te komen door te zeggen “Dit is niet het resultaat van evolutie, god heeft het gewoon zo geschapen.”

De zwakheid van deze verklaring is dat ze precies niets verklaart. Een almachtige god kan immers alles, er is geen aanwijzing denkbaar waarvoor een almachtige god *niet* gezorgd kan hebben. De verklaring is dus niet weerlegbaar en daarmee wetenschappelijk waardeloos. Daarnaast geeft de god-heeft-het-gedaan-verklaring geen enkele uitleg over waardoor het komt dat we bepaalde dingen waarnemen en andere dingen niet. Het verklaart bijvoorbeeld niet waarom slangen eerst poten ontwikkelen, die vervolgens weer afgebroken worden. In het licht van hun evolutionaire geschiedenis is dit echter goed te verklaren.

Hopelijk is uit het bovenstaande duidelijk geworden dat een evolutiebioloog, net als een detective, via indirecte aanwijzingen tot een bepaalde conclusie kan komen. Voor de evolutiebioloog betekent dit dat evolutie een feit is, al het leven is via gemeenschappelijke voorouders met elkaar verbonden. Het is met alle voorhanden aanwijzingen zelfs mogelijk om deze levensboom tot in vrij veel details te reconstrueren. De werkelijkheid van evolutie is dan ook de enige mogelijke conclusie voor wie goed naar alle aanwijzingen kijkt.

Bronnen en aan te raden literatuur

Helaas zijn er relatief weinig goede Nederlandse boeken over evolutie. De meeste zijn zelfs nog vertalingen uit het Engels. Een aanrader van vrij recente datum is “*Evolutie, triomf van een idee*” van Carl Zimmer (Het Spectrum, 2003). Dezelfde auteur heeft ook een boek geschreven over de evolutie van viervoeters uit vissen en walvisachtigen uit landzoogdieren: “*Aan de waterkant, over de evolutie van soorten*” (Contact, 1999). Bas Haring geeft in zijn boekje “*Kaas en de evolutietheorie*” (Houtekiet, 2005) een aardige uiteenzetting over de werking van evolutie. Tot slot zijn verschillende vertaalde titels van de twee grote evolutiebiologen Stephen Jay Gould en Richard Dawkins aan te raden. Over de sporen van evolutie in het menselijk lichaam heb ik een on-line artikel geschreven (met de nodige verwijzingen naar wetenschappelijke literatuur) dat te vinden is op:
http://www.freewebs.com/deatheist/Artikelen/Sporen_evolutie.pdf

In het Engels is er een gigantische berg literatuur beschikbaar over evolutie. Algemene introducties worden gegeven in “*Evolution*” van Mark Ridley (Blackwell Publishing, 2003), “*Evolution*” van Monroe Strickberger (Jones & Bartlett Publishers, 2000) en “*Evolutionary biology*” van Douglas Futuyma (Sinauer Associates, 1997). Een goede bespreking van de meest recente levensboom is “*Assembling the Tree of Life*” door Joel Cracraft en Michael Donoghue (red.) (Oxford University Press, 2004). Een recente bespreking van de evolutie van de gewervelden en de fossielen daarvan is te vinden in “*Vertebrate Palaeontology*” van Michael Benton (Blackwell Publishing, 2004). Een recent boek dat geheel gewijd is aan de evolutie van de mens en de vele fossiele mensachtigen is “*Principles of Human Evolution*” van Roger Lewin en Robert Foley (Blackwell Publishing, 2003).

Tot slot zijn er nog de vele wetenschappelijke tijdschriften waar de laatste bevindingen op het gebied van de evolutiebiologie worden gepubliceerd. Dit zijn er echter teveel om op te noemen. De belangrijkste bevindingen worden meestal gepubliceerd in een van de twee grootste wetenschappelijke tijdschriften ter wereld, *Nature* en *Science*.

Figuurverantwoording

Figuur 1: Daeschler *et al.* (2006). A Devonian tetrapod-like fish and the evolution of the tetrapod body plan. *Nature*, 440:757-763.

Figuur 2: http://www.santharia.com/pictures/aragorn/aragorn_pics/centaur.jpg

Figuur 3: Lewin *et al.* (2003). Principles of human evolution, Blackwell Publishing.

Figuur 4: Nilsson. (1996). Het grote wonder, Ploegsma bv, 23e druk.

Figuur 5: Bejder *et al.* (2002). Limbs in whales and limblessness in other vertebrates: mechanisms of evolutionary and developmental transformation and loss. *Evolution & Development*, 4:445-458.