

5. Ontwikkeling van het begrip natuurlijke selectie bij leerlingen

Caspar Geraedts, Didactiek van de Biologie, Universiteit Utrecht

5.1 Inleiding

Wanneer we uitgaan van het idee dat het leven op aarde niet constant is, maar in de loop der tijd verandert, dan dringt zich onmiddellijk de vraag op *hoe* leven dan verandert. Denkbeelden over het mechanisme van evolutie vinden we al vóór de tijd van Darwin, onder andere bij de zoöloog Jean-Baptiste de Lamarck (1744-1829). Lamarck stelde dat veranderingen in de omgeving een directe invloed hebben op het gedrag en de leefgewoonten van een organisme, hetgeen wordt vastgelegd in een vormverandering van de betrokken organen of lichaamsfuncties. We zouden kunnen zeggen dat de omgeving het organisme instrueert hoe te veranderen. Een dergelijke verklaring voor evolutie wordt dan ook aangeduid met de term instructietheorie. Anderen meenden dat het evolutieproces wordt gestuurd door een goddelijke macht en dat het was voorbeschikt dat evolutionaire vooruitgang zou uitmonden in het ontstaan van de mens. Beide theorieën hebben zware kritiek te verduren gekregen en hebben nauwelijks aanhang gevonden in de wetenschappelijke gemeenschap (zie Theunissen & Visser, 1996).

Een andere verklaring voor evolutie wordt gegeven in 1859, als Charles Darwin zijn boek *On the Origin of of Species by Means of Natural Selection* publiceert. Op elegante wijze geeft Darwin hierin een verklaring voor het veranderen en ontstaan van soorten die, in tegenstelling tot veel eerdere theorieën, enkel is gebaseerd op natuurlijke processen. Het verschijnen van *the Origin* leidde onder collega wetenschappers echter niet onmiddellijk tot acceptatie van natuurlijke selectie als mechanisme van evolutie. Zo kon Darwin bijvoorbeeld niet verklaren hoe erfelijke eigenschappen worden doorgegeven volgende generaties. Het ontbrak hem ook aan een verklaring voor het ontstaan van nieuwe variatie. Echter, met de herontdekking van het werk van Gregor Mendel (1822-1884) in de eerste helft van de twintigste eeuw, en de mutatietheorie van Hugo de Vries (1848-1935), kwam op deze vragen een antwoord. De synthese van deze nieuwe ontdekkingen met Darwin's selectietheorie bracht een fundamentele verandering teweeg in het biologisch denken. De neodarwinistische evolutietheorie wordt inmiddels algemeen geaccepteerd als mechanisme voor soortvorming. Het verklarend vermogen van de theorie strekt zich bovendien ver uit buiten de grenzen van de evolutiebiologie alleen: de neodarwinistische evolutietheorie geeft samenhang en structuur aan de hele biologie.

Het is dan ook vanzelfsprekend dat natuurlijke selectie een belangrijk onderdeel vormt van het biologieonderwijs op het voortgezet onderwijs. Echter, vakdidactisch onderzoek laat zien dat het leren van natuurlijke selectie lang niet altijd succesvol verloopt. Er lijkt een aantal valkuilen te zijn die een juist begrip van de neodarwinistische evolutietheorie in de weg staan. Deze begripsproblemen staan overigens los van eventuele levensbeschouwelijke problemen ten aanzien van de idee evolutie (Bishop & Anderson, 1990; zie hoofdstuk 3). In dit hoofdstuk worden deze valkuilen omschreven, en wordt een leertraject voorgesteld waarmee deze moeilijkheden kunnen worden omzeild.

We kunnen enig zicht krijgen op de genoemde begripsproblemen door te kijken naar wat leerlingen antwoorden als wij hen vragen een verklaring te geven voor het ontstaan van soorten. De onderstaande afspraken zijn afkomstig uit de Engelstalige vakdidactische literatuur. Het is niet altijd duidelijk in hoeverre de geciteerde leerlingen al onderwijs over natuurlijke selectie hebben gehad.

[Over het ontstaan van verschillende huidskleuren bij mensen.] *Als ze daar al lang leven dan is de [donkere] kleur niet meer nodig. In noordelijke landen heb je die niet nodig, dus verlies je dat geleidelijk aan. Als er veel zon is, krijg je meer variatie.* (Brumby, 1984)

[Over het voorkomen van donker gekleurde rupsen in een donker milieu.] *Omdat, op een gegeven moment zijn soorten... aan het uitsterven, dus ze wisten dat ze moesten veranderen. En het zal wel lang geduurd hebben, maar ze werden langzaam donkerder, tot ze donker genoeg waren om zo te overleven.* (Clough & Wood-Robinson, 1985)

[Over het ontstaan van de dikke vacht van de poolvos.] *Toen de vos nog een korte vacht had, zal ie het zo koud gehad hebben dat... ie wist dat ie moest veranderen. En in de volgende generatie*

zal ie deze resistentie overgedragen hebben op zijn nakomelingen. Want hij moet gedurende de jaren een resistentie opgebouwd hebben. (Clough & Wood-Robinson, 1985)

Het valt op dat de bovenstaande uitspraken niet erg zorgvuldig zijn geformuleerd. Als we de uitspraken heel letterlijk opvatten, en we nemen aan dat leerlingen bedoelen dat individuele organismen veranderen, dan doen deze verklaringen erg denken aan de instructietheorie van Lamarck (zie hoofdstuk 2). In veel publicaties wordt dan ook gesproken over lamarckistische denkbeelden bij leerlingen. Uit onderzoek blijkt echter dat lamarckistische denkbeelden niet zo hardnekkig zijn, en niet zo veel voorkomen als in de literatuur wel wordt beweerd (Geraedts & Boersma, 2000). Over het algemeen zijn de denkbeelden van leerlingen over soortvorming niet erg vastomlijnd. Leerlingen doen soms uitspraken die erg doen denken aan de instructietheorie van Lamarck, maar daarnaast komen we ook uitspraken tegen waarin we elementen uit de neodarwinistische evolutietheorie herkennen.

Maar de vraag blijft hoe we bereiken dat leerlingen een adequaat begrip van de neodarwinistische evolutietheorie ontwikkelen? Immers, mondelinge instructie, of een schriftelijke uiteenzetting over het onderwerp blijkt vaak onvoldoende om een eenduidig, consistent begrip van natuurlijke selectie aan te leren (Brumby, 1979, 1984; Halldén, 1988; Hendrikse & Boersma, 1999). In de volgende paragraaf wordt een effectieve leerstrategie uitgewerkt, waarbij leerlingen onderzoeken waarom een instructietheorie niet voldoet als verklaring voor evolutie, en zelf het begrip natuurlijke selectie stap voor stap opbouwen.

5.2 Lamarckisme versus neodarwinisme

In hoofdstuk 1 is uiteengezet waarom een argumentatiebenadering bij het behandelen van het thema evolutie eigenlijk de meest voor de hand liggende aanpak is. Deze benadering biedt niet alleen ruimte voor de levensbeschouwelijke overtuiging van leerlingen, maar stimuleert ook dat verschillende (wetenschappelijke) opvattingen op hun geldigheid worden getoetst. Laten we daarom de lamarckistische en de neodarwinistische evolutietheorie eens nader met elkaar vergelijken. De instructietheorie van Lamarck omvat de volgende denkbeelden:

- (a) individuele organismen passen zich aan,
- (b) deze aanpassingen (veranderingen) worden door de omgeving veroorzaakt en
- (c) deze aanpassingen worden doorgegeven aan de nakomelingen.

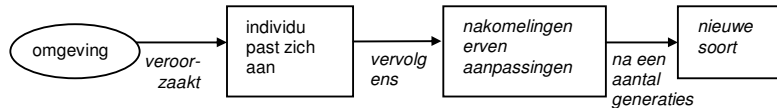
De neodarwinistische evolutietheorie laat zich als volgt beschrijven:

- (i) binnen een populatie organismen is variatie aanwezig,
- (ii) deze variatie is (gedeeltelijk) erfelijk,
- (iii) bepaalde individuen zullen (op grond van deze variatie) een hogere overlevingskans en een groter voortplantingssucces hebben dan andere individuen,
- (iv) hierdoor verandert de populatie van samenstelling (er zullen relatief meer individuen zijn met eigenschappen die zorgen voor een groter voortplantingssucces),
- (v) door mutatie en recombinatie ontstaat nieuwe variatie.

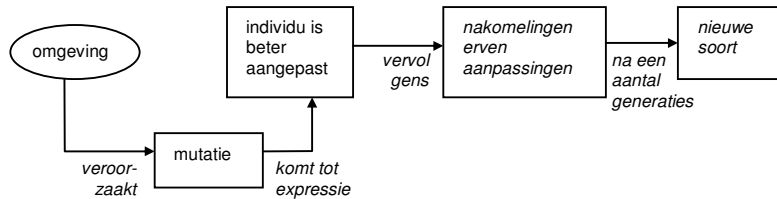
De instructietheorie van Lamarck en de neodarwinistische evolutietheorie kunnen worden weergegeven in een conceptmap (zie figuur 1a en figuur 2). Als we deze conceptmaps met elkaar vergelijken, dan vallen enkele essentiële verschillen tussen de twee mechanismen op:

- Bij de neodarwinistische evolutietheorie is een groter aantal concepten betrokken. Bijvoorbeeld de begrippen populatie, variatie, overlevingskans en voortplantingssucces.
- Bij de neodarwinistische evolutietheorie zijn meerdere biologische organisatieniveaus betrokken. We onderscheiden het populatieniveau, het organismaal niveau en het (sub)cellulair niveau. Bij de instructietheoretische verklaring is alleen sprake van het organismaal niveau.
- Volgens de neodarwinistische evolutietheorie voltrekt verandering (evolutie) zich op het populatieniveau. Door een verschil in voortplantingssucces (organismaal niveau) verandert de populatie van samenstelling. Volgens een instructiemechanisme is verandering juist merkbaar op het organismaal niveau: individuele organismen passen zich aan.

- De rol van de omgeving in beide redeneringen is verschillend. Volgens de instructietheorie speelt het milieu een actieve rol. Een verandering in het milieu heeft een verandering in het organisme tot gevolg, het organisme vormt zich naar de omgeving. Volgens de neodarwinistische verklaring bestaat de rol van de omgeving niet uit instructie maar uit selectie. Welke individuen een selectievoordeel hebben is afhankelijk van milieufactoren.
- Het instructiemechanisme is puur deterministisch, de neodarwinistische evolutietheorie is meer probabilistisch. Bepaalde individuen hebben een hogere kans om te overleven en nakomelingen te produceren. Het toeval speelt een rol bij de mutagenese (zie figuur 1b): er treden toevallige, willekeurige veranderingen op in het genetisch materiaal.

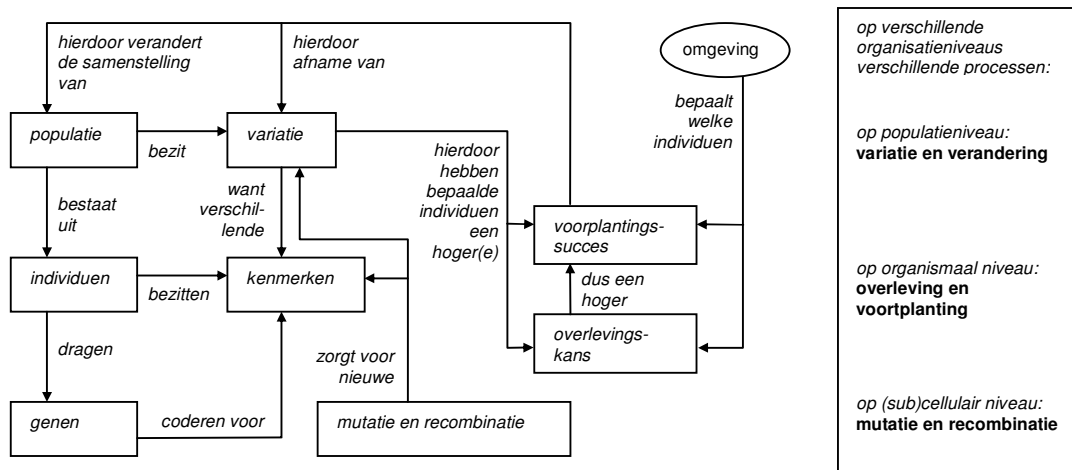


a. Lamarckistisch instructiemechanisme



b. Instructiemechanisme volgens gerichte mutagenese

Figuur 1. Verklaringen voor het ontstaan van soorten volgens een instructiemechanisme, weergegeven in conceptmaps.



Figuur 2. Een neodarwinistische verklaring voor evolutie, weergegeven in een conceptmap. In een populatie is variatie. Op grond van deze variatie hebben bepaalde individuen een hogere kans om te overleven en een hoger voortplantingssucces in die specifieke omgeving. Als deze variatie erfelijk is, zijn er in de volgende generatie meer individuen met die kenmerken die zorgen voor een hoog voortplantingssucces. De populatie verandert van samenstelling, er vindt evolutie plaats.

Het lijkt erop dat de problemen van leerlingen bij het leren van natuurlijke selectie in sterke mate samenhangen met de hierboven genoemde ontologische verschillen tussen de lamarckistische en de neodarwinistische verklaring voor soortvorming (Ferrari & Chi, 1998). In het evolutieonderwijs is het dus van belang om leerlingen op deze verschillen opmerkzaam te maken. Vooral de gelaagdheid in organisatieniveaus en het gegeven dat evolutie zich voltrekt op het niveau van de populatie zijn belangrijke eigenschappen van de neodarwinistische evolutietheorie (Hendrikse & Boersma, 1999).

Om te bereiken dat leerlingen in staat zijn de neodarwinistische evolutietheorie toe te passen bij vraagstukken over het veranderen of ontstaan van soorten, dienen zich twee complementaire strategieën aan: (a) het aantonen van de (biologische) onwaarschijnlijkheid van een instructietheorie, (b) het aannemelijk maken van de neodarwinistische evolutietheorie. Deze twee strategieën worden hieronder kort besproken.

Het toetsen van de instructietheorie van Lamarck

We kunnen hier de vraag centraal stellen of eigenschappen die tijdens het leven zijn verworven aan de nakomelingen worden doorgegeven. Dit is immers het basisidee van de instructietheorie. Leerlingen komen in het dagelijks leven ook talloze voorbeelden tegen van organismen die zich aanpassen aan hun omgeving. Waarom zou dit aanpassingsvermogen (cumulatief) niet leiden tot het ontstaan van nieuwe soorten? Het is van belang dat we hier aandacht besteden aan de relatie tussen genen en (fenotypische) eigenschappen. Leerlingen hebben weliswaar een zeker begrip van de (moleculaire) genetica, maar brengen deze kennis over het algemeen niet in verband met evolutionaire processen (Baalmann, Frerichs en Kattmann, 1998). Om een scherp onderscheid te leren maken tussen erfelijke en niet-erfelijke eigenschappen is het goed om te kijken naar concrete kenmerken van organismen. We zouden met leerlingen bijvoorbeeld kunnen bespreken of de volgende eigenschappen van organismen al dan niet worden doorgegeven aan de nakomelingen: (a) een bodybuilder wordt steeds gespierder door intensieve training, (b) een vrouw verliest door een ongeluk één van haar handen, (c) een ijsbeer valt met zijn witte vacht niet op in een besneeuwde omgeving, (d) een blank meisje verhuist naar Afrika en haar huid wordt in de loop der tijd bruin, (e) een inwoner van Tanzania heeft een donkerbruine huid, etc. Zo zijn er natuurlijk talloze voorbeelden te verzinnen, waarvan de meeste leerlingen ofwel uit eigen ervaring, ofwel intuïtief aanvoelen of de desbetreffende eigenschap wel of niet erfelijk is. Het bespreken van een aantal concrete kenmerken zou dan kunnen uitmonden in een algemene uitleg over de relatie tussen genetisch materiaal en fenotypische eigenschappen, en het idee dat het genotype van een organisme in principe onveranderbaar is.

Op dit moment zouden leerlingen het argument kunnen aanvoeren dat er na een groot aantal generaties uiteindelijk wel verandering merkbaar zou kunnen zijn. Ook hier kunnen we een aantal voorbeelden noemen die deze redenering tegenspreken:

De oorspronkelijke bewoners van Australië, de aboriginals, hebben een donkere huidskleur. Ruim twee eeuwen geleden werd het land gekoloniseerd door (blanke) Engelsen. Het grootste deel van de huidige bevolking van dit land stamt af van deze kolonisten (92%) en is gewoon blank. Ook heeft Australië het hoogste percentage patiënten met huidkanker ter wereld.

Begin deze eeuw deed de bioloog Weiss onderzoek naar de erfelijkheid van eigenschappen. In zijn laboratorium amputeerde hij de staarten van een groep muizen. Van de nakomelingen van deze muizen amputeerde hij weer de staarten. Hij deed dit dertig generaties achter elkaar. De muizen bleven nakomelingen krijgen met een staart. (Jiménez Aleixandre, 1992.)

We mogen verwachten dat leerlingen nu inzien dat een instructiemechanisme in strijd is met de principes van de erfelijkheidsleer, en dus niet voldoet als verklaring voor evolutie.

Het fenotype wordt weliswaar gedeeltelijk bepaald door biotische en abiotische milieufactoren; het is enkel het genetisch materiaal dat aan de nakomelingen wordt doorgegeven. Aanpassingsvermogen, voor zover dat genetisch is vastgelegd, is natuurlijk wel erfelijk. Bij het vak ANW zal het niet nodig zijn om dieper in te gaan op de moleculair-genetische processen die ten grondslag liggen aan het erfelijkheidsprincipe. Bij biologie kan men hier wel uitgebreid aandacht aan besteden.

Het aannemelijk maken van de neodarwinistische evolutietheorie

In de meeste leerboeken wordt de evolutietheorie in enkele alinea's tekst uitgewerkt, waarna bij wijze van toetsing enkele vragen worden gesteld. Niet alleen blijkt deze aanpak niet efficiënt, een andere mogelijkheid ligt misschien meer voor de hand. Gough (1978) wijst op het logische, bijna wetmatige karakter van Darwin's oorspronkelijke selectietheorie. Hij stelt daarom dat de theorie uitermate geschikt is om leerlingen duidelijk te maken wat 'logisch redeneren' inhoudt.

We kunnen de redenering natuurlijk ook omdraaien en de deductieve (als... dan...) structuur van de selectietheorie benutten om leerlingen zelf de theorie te laten 'construeren'. Uitgaande van Darwin's axioma's (bijvoorbeeld 'er is variatie') zijn leerlingen misschien goed in staat om daar de juiste gevolgtrekkingen uit af te leiden ('sommige individuen hebben een hogere overlevingskans'). Door het aanbieden van de juiste vragen op het juiste moment kunnen leerlingen min of meer zelfstandig de neodarwinistische evolutietheorie opbouwen. Op deze manier worden leerlingen gedwongen om zelf over elke stap in de redenering na te denken. Mogelijk ontwikkelen zij daarmee ook een grondiger begrip van de theorie. Er is dus gezocht naar een logische opeenvolging van vragen die samen een leidraad vormen bij het opbouwen van de neodarwinistische evolutietheorie. Hierbij zou iedere vraag min of meer logisch uit de vorige moeten volgen¹. Een mogelijke opeenvolging van vragen is weergegeven in figuur 3.

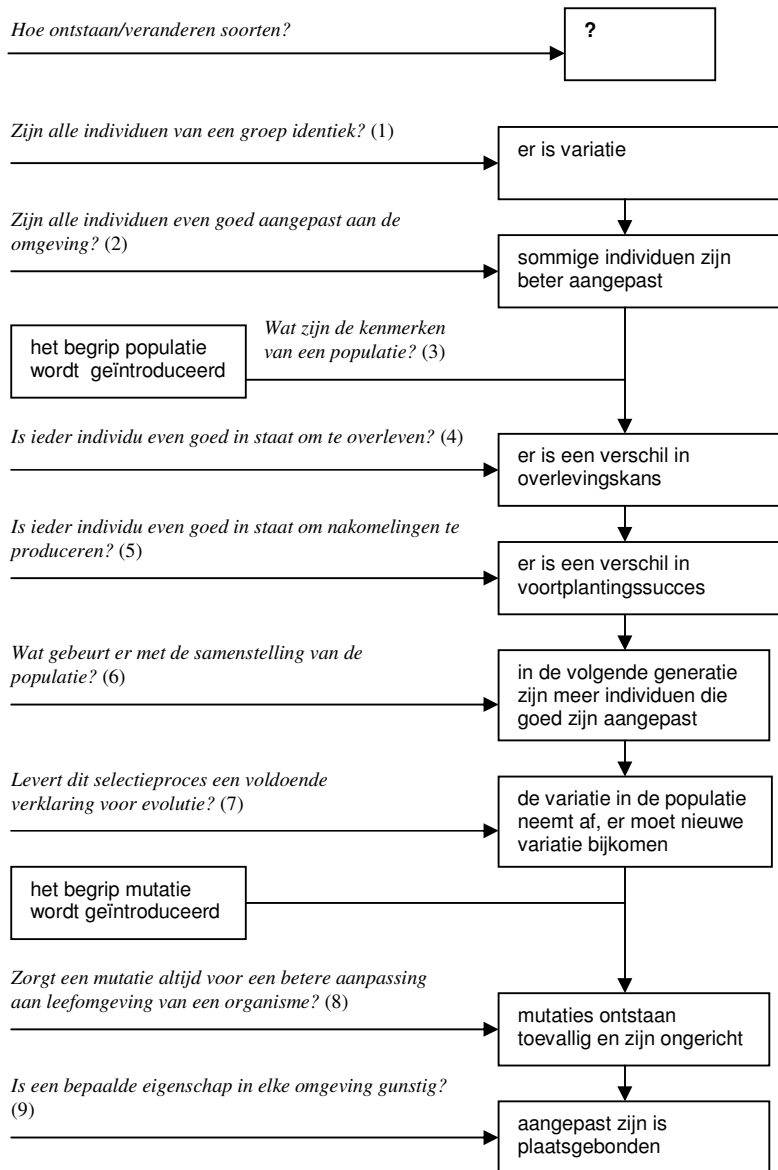
In de eerste vraag wordt het begrip variatie aan de orde gesteld. Het beoogde antwoord hier is dat individuen niet identiek zijn. Omdat de individuen van een groep organismen van elkaar verschillen, zijn niet alle individuen even goed aan hun leefomgeving aangepast (vraag 2). Op dit punt is het waarschijnlijk nodig om een scherpere definitie van 'een groep individuen' te geven. De term populatie wordt geïntroduceerd en de kenmerken van een populatie worden behandeld (vraag 3). Voortbouwend op vraag 2 kan nu de vraag worden gesteld of ieder individu van een populatie zich even goed weet te handhaven in de leefomgeving (vraag 4). Hieruit valt dan een verschil in voortplantingssucces af te leiden (vraag 5). Op grond van het voorgaande wordt de leerlingen vervolgens gevraagd een voorspelling te doen over de samenstelling van de populatie na een aantal generaties (vraag 6). Een belangrijke voorwaarde voor verandering van de samenstelling is wel dat de variatie in de populatie (tenminste voor een deel) erfelijk is. Deze aanname wordt van tevoren geëxpliciteerd. Het is van belang dat leerlingen hier inzien dat door selectie de variatie in de populatie afneemt: er zal dus nieuwe variatie bij moeten komen om het evolutieproces verder te laten verlopen (vraag 7). Naar aanleiding hiervan wordt het ontstaan van mutaties besproken. Er wordt ook iets verteld over de genetische basis van mutaties: het zijn toevallige veranderingen in het DNA. Dan wordt de vraag gesteld of mutaties per definitie voordelig zijn (vraag 8). Tot slot komt de plaatsgebondenheid van fitness aan de orde (vraag 9).

Deze sequentie van vragen leidt, gesteld dat iedere vraag juist wordt beantwoord, tot de ontwikkeling van de neodarwinistische evolutietheorie. Iedere vraag bouwt min of meer voort op het voorgaande. Het grootste deel van de begripsontwikkeling geschiedt aan de hand van deze vragen. Alleen de begrippen *populatie* en *mutatie* worden nieuw geïntroduceerd en uitgewerkt. Het begrip *de strijd om het bestaan* komt in de hierboven uitgewerkte vraagstructuur niet expliciet aan de orde. Desgewenst kan dit begrip in de sequentie opgenomen worden. Echter, de *struggle for life* is weliswaar één van Darwin's oorspronkelijke premissen, maar het idee dat in de natuur niet alle individuen van een groep zullen overleven is misschien een beetje triviaal. Bovendien komt teveel de nadruk te liggen op overlevingskans, terwijl voor natuurlijke selectie uiteindelijk alleen reproductief succes van belang is.

¹ Deze aanpak kunnen we aanduiden met de term geleide herontdekking (guided reinvention).

de vragen in het
lesmateriaal

de beoogde antwoorden
van leerlingen



Figuur 3. Schematisch overzicht van de opeenvolging van vragen die moet leiden tot de ontwikkeling van de neodarwinistische evolutietheorie, en de beoogde antwoorden op deze vragen. De cijfers achter iedere vraag verwijzen naar de vragen uit het lesmateriaal. In het schema staat ook weergegeven op welk moment de begrippen populatie en mutatie worden geïntroduceerd.

Box 1. Het simulatiespel van Stebbins & Allen (1975)

Een aantal belangrijke kenmerken van de neodarwinistische evolutietheorie kunnen we heel mooi illustreren met een simulatiespel dat voor het eerst werd beschreven door Stebbins & Allen (1975). Bij deze simulatie wordt gebruik gemaakt van het principe van kleurselectieve predatie: bepaalde kleuren prooidieren vallen meer op dan andere en worden daarom eerder gevangen door predatoren. De door de auteurs aanbevolen materialen maken de simulatie uitermate geschikt voor gebruik in de klas. Een grote hoeveelheid verschillend gekleurde kraaltjes of fiches stelt een populatie prooidieren voor (van één soort), een bonte lap stof doet dienst als leefomgeving en de leerlingen zelf zijn de predatoren. Een kartonnen 'pim-pam-pet' wiel wordt gebruikt om het ontstaan van mutaties na te bootsen.

Beschrijving van het simulatiespel

Er zijn tien verschillende kleuren kraaltjes. We nemen aan dat de kleur van deze organismen (de kraaltjes) wordt bepaald door één gen. Er zijn dus tien verschillende varianten van dit gen, die ieder verantwoordelijk zijn voor één specifieke kleur. Als een kraaltje zich voortplant krijgt hij in principe identieke nakomelingen. Een rood kraaltje krijgt dus rode kinderen. Maar er kunnen door mutaties ook nieuwe varianten van een gen, en dus ook nieuwe eigenschappen ontstaan. Het kan dus voorkomen dat een rood kraaltje toevallig een geel kindje krijgt. Welke kleur zo'n mutant heeft wordt bepaald met het mutatiewiel. De bonte lap stof stelt de leefomgeving van de kraaltjes voor. We zouden ze kunnen beschouwen als een eiland. Op de kraaltjes wordt gejaagd, het zijn prooidieren. De rol van roofdier wordt vervuld door de leerlingen: ze 'jagen' op de kraaltjes door ze van hun leefomgeving weg te nemen.

Aan het begin van het experiment zijn de eilanden nog onbevolkt. Vervolgens wordt ieder eiland bevolkt door een kleine groep organismen die afkomstig is van één populatie kraaltjes op het vasteland. In de populatie op het vasteland komen vier verschillende kleurvarianten voor. Op ieder eiland komen 25 individuen terecht. Dit is de startpopulatie. Volg nu de volgende stappen.

de startpopulatie: Noteer in een tabel hoeveel individuen van elke kleurvariant aanwezig zijn.

voortplanting: Deze 25 individuen gaan zich voortplanten. Daartoe krijgt ieder kraaltje 3 identieke nakomelingen. Als er dus 4 roze kraaltjes aanwezig zijn in de startpopulatie dan worden er nog (4 keer 3 is) 12 roze kraaltjes bijgedaan. Nu bestaat de populatie dus uit 100 individuen. De 100 kraaltjes worden gelijkmatig over het eiland verspreid.

selectie: Vijf leerlingen vervullen de rol van roofdier. Zij gaan om het eiland heen staan met hun rug naar de tafel toe. Op een bepaald teken draait ieder 'roofdier' zich om naar het eiland, en pakt het eerste kraaltje dat hij/zij ziet. Vervolgens wordt een tweede kraaltje weggenomen (weer het eerste kraaltje dat wordt gezien), en dit wordt net zolang herhaald totdat ieder 'roofdier' 15 prooidieren heeft weggepakt. Er zijn nu 25 prooidieren overgebleven. Noteer in de tabel hoeveel kralen er van iedere kleur zijn overgebleven (de 1^e generatie).

voortplanting en mutatie: De overgebleven 25 individuen planten gaan zich weer voortplanten. Ieder kraaltje krijgt 3 nakomelingen die aan de populatie worden toegevoegd. De populatie bestaat nu weer uit 100 individuen. Maar door mutaties kunnen er nakomelingen ontstaan met nieuwe eigenschappen (in dit geval nieuwe kleuren). In deze simulatie gaan we er van uit dat 10 nakomelingen een gemuteerd gen erven. De populatie kraaltjes wordt in een bakje gedaan en door elkaar gehusseld. Een leerling neemt met zijn ogen dicht 10 kraaltjes uit het bakje. Er zijn dan nog 90 kraaltjes over. De 10 kraaltjes worden vervangen door 10 'mutanten'. De kleur van iedere mutant wordt bepaald met het mutatiewiel. De 10 mutanten worden vervolgens aan de 90 kraaltjes toegevoegd. De populatie bestaat nu uit 90 'normale' kraaltjes en 10 mutanten.

selectie: De 100 kraaltjes worden weer over het eiland verdeeld. Er zijn weer vijf 'roofdieren' die ieder 15 kraaltjes wegnemen (zie hierboven). Er blijven 25 weer kraaltjes over. Noteer in de tabel hoeveel kralen er van iedere kleur zijn overgebleven (de 2^e generatie).

Herhaal de cyclus **voortplanting-mutatie-selectie** nog vier maal totdat je in totaal zes selectierondes hebt gehad. We kunnen nu de volgende vragen stellen. Wat is er veranderd aan de populatie ten opzichte van de startpopulatie? Welke kleurvarianten hebben de hoogste overlevingskans in deze

specifieke omgeving? Zijn de nieuwe kleuren (mutanten) die ontstaan altijd goed aangepast aan hun leefomgeving?

5.3 De praktijk

Hoe werkt de in §4.2 beschreven aanpak in de praktijk? De hierboven beschreven leerstrategie is meermalen uitgetest, zowel bij 4 vwo leerlingen als bij 4 havo leerlingen, en zowel bij biologie als bij ANW. Het functioneren van het lesscenario in de klas, en de invloed van de lessen op de denkbeelden van leerlingen zijn daarbij nauwkeurig bestudeerd. Een aantal uitkomsten van deze studie worden in deze paragraaf besproken².

De vragen

De eerste vragen uit het lesmateriaal, over de vraag of tijdens het leven verworven eigenschappen aan de nakomelingen worden overgedragen, leveren eigenlijk weinig problemen op. Het merendeel van de leerlingen ziet in dat de gegeven voorbeelden (zie vorige paragraaf) in strijd zijn met de instructietheorie:

De inwoners [van Australië] zijn na generaties nog blank. Die zouden bruin moeten zijn omdat ze steeds bruiner worden omdat hun ouders door de zon bruin werden. Een verandering tijdens je leven zorgt er kennelijk niet voor dat je kinderen dat erven.

De muizen hebben hun staart nodig om te overleven. In het DNA ligt vast dat muizen een staart krijgen bij de geboorte. Met het amputeren van de staart verander je het DNA niet.

De vragen over de begrippen variatie en selectie (de eerste stappen in de sequentie van vragen van figuur 3) worden ook juist beantwoord door de meeste leerlingen. Uit geluidsopnamen die tijdens de lessen zijn gemaakt blijkt dat er over het algemeen weinig tijd wordt besteed aan deze vragen. Het kost de leerlingen kennelijk weinig moeite om het selectiemechanisme te begrijpen. De desbetreffende vragen handelden over een populatie vossen die zich verplaatst naar een kouder leefgebied. De vachtdikte van de vossen in deze populatie varieert van 1 tot 2 centimeter. De leerlingen antwoorden hier dat de vossen met de dikste vachten een relatief hoger voortplantingssucces hebben, en dat daardoor de samenstelling van de populatie verandert. De meeste moeilijkheden doen zich voor op het moment dat leerlingen zouden moeten inzien het ontstaan van nieuwe variatie noodzakelijk is voor de voortgang van het evolutieproces (vraag 7, figuur 3). De vraag wordt gesteld of natuurlijke selectie alleen een voldoende verklaring levert voor het ontstaan van de 5 centimeter dikke vacht van de poolvos. Op grond van wat tot op dit moment in het lesmateriaal aan de orde is gekomen zou een leerling deze vraag ontkennend moeten beantwoorden, aangezien in de oorspronkelijke populatie geen vossen voorkomen met vacht dikker dan 2 cm:

L5 Maar die vacht zal dus nooit dikker worden dan 2 centimeter. Gewoon omdat... er zijn geen vossen met een vacht dikker dan 2 centimeter. Dus dan zal die van de nakomelingen ook nooit meer dan 2 centimeter worden. [...] Ik wou zeggen, die vacht die wordt toch niet dikker? Als je alleen maar vossen hebt met een 2 centimeter dikke vacht, dan krijgen die kinderen ook een 2 centimeter dikke vacht.

L6 Dan krijgen ze niet 4 centimeter.

L5 Nee, dat wou ik nou net duidelijk maken.

Echter, een betrekkelijk groot deel van de leerlingen antwoordt hier dat het ontstaan van de dikke vacht van de poolvos wél door selectie kan worden verklaard. Er lijken verschillende redeneringen aan deze opvatting ten grondslag te liggen. Enkele leerlingen geven een lamarckistische verklaring voor het steeds dikker worden van de vacht. We mogen echter niet aannemen dat alle leerlingen uitgaan van een instructietheorie. Een aantal leerlingen heeft het over organismen die zich aanpassen aan hun

² Een gedetailleerd verslag van het onderzoek wordt gegeven door Geraedts & Boersma (2000).

omgeving, maar het blijft veelal onduidelijk of het gaat over individuele vossen of over de soort. Bij andere leerlingen treffen we het idee aan dat er steeds nieuwe variatie bijkomt:

Ja, er zullen vast een paar vossen zijn met een dikkere vacht dan 2 cm en deze planten zich voort en dan krijg je een populatie met vossen met dikke vachten.

Het is best mogelijk dat sommige leerlingen impliciet uitgaan van het ontstaan van nieuwe variatie.

Algemene indruk

Het lijkt erop dat het ontwikkelde lesscenario effectief is bij het leren van natuurlijke selectie. Uit een schriftelijke test die na afloop van de lessen werd afgenomen blijkt dat een betrekkelijk groot deel van de leerlingen (59%) een neodarwinistische verklaring voor soortvorming geeft. Nog eens 13% van de leerlingen hanteert wel een selectiemechanisme als verklaring voor soortvorming, maar betreft hier niet het ontstaan van nieuwe variatie (mutaties) bij. Consistent lamarckistische denkbeelden treffen we aan bij 6% van de leerlingen. Deze resultaten zijn zeker positief in vergelijking met de leerprogramma's die door andere onderzoekers werden uitgewerkt en beproefd (Bishop & Anderson, 1990; Demastes, Settlage & Good, 1995; Greene, 1990; Halldèn, 1988; Hendrikse & Boersma, 1999).

5.4 Nabeschuiving

We mogen concluderen dat de voorgestelde leerstrategie betrekkelijk effectief is voor het aanleren van een neodarwinistische visie op evolutie. Het opbouwen van de redenering die ten grondslag ligt aan het selectiemechanisme levert nagenoeg geen problemen op. De moeilijkheden lijken voornamelijk te liggen bij het inzicht dat door selectie de variatie in de populatie afneemt, en er dus nieuwe variatie bij moet komen om het evolutieproces verder te laten verlopen. Darwin realiseerde zich zelf heel goed dat zijn theorie op dit punt eigenlijk tekort schoot. Het is onduidelijk in hoeverre leerlingen de noodzaak van het ontstaan van nieuwe variatie inzien.

Voor een volledig begrip van de neodarwinistische evolutietheorie is het dus nodig om enige kennis te verwerven over de genetische basis van fenotypische variatie, en het ontstaan van mutaties en andere toevallige veranderingen in het genetisch materiaal. Aangezien aan evolutionaire verandering uiteindelijk veranderingen in het genetisch materiaal ten grondslag liggen, blijft toch de vraag hoe deze veranderingen tot stand komen. Met andere woorden, hoe ontstaat dat eerste individu die op grond van zijn genetisch materiaal iets beter is aangepast aan de omgeving dan zijn soortgenoten?

- L7 [Is iedere giraffe in de groep even goed aangepast aan de omgeving?] *Volgens mij in het begin niet. Maar op het eind wel. Want ze gaan... of niet. Want ze passen zich aan aan de omgeving.*
- L8 *Ja, dat weet je niet.*
- L7 *Nee. Eigenlijk kun je dit dus helemaal niet weten. Want je weet niet of ze zich wel... of ze zich echt aanpassen aan de omgeving.*
- L8 *Ja.*
- L7 *Doen ze dat wel, dan heb je inderdaad die eigenschap, dat die doorgegeven wordt.*
- L8 *Ja, wat is het meest logische denk je. Ik denk dat ze zich na een tijdje wel aan gaan passen.*
- L7 *Ja.*
- L8 *Omdat ze anders sterven van de honger. Dus of ze gaan dood, of ze...*
- L7 *Maar eigenlijk, dit kan helemaal niet dat ze zich aanpassen. Die eigenschap ontwikkelen ze ook als ze gewoon leven. Dus, eigenlijk in het DNA van hun wordt eigenlijk niks aangepast, of wel?*
- L8 *Ja, in het DNA niks. Alleen...*
- L7 *Nee, maar kijk, hoe kunnen ze het dan doorgeven? Dan kunnen ze het toch niet doorgeven, als het niks aan het DNA verandert?*
- L8 *Nee, dat is inderdaad vreemd.*
- L7 *En ze planten zich voort, dan kunnen ze toch niks doorgeven?*
- L8 *Vaag. Hier moet je echt lang over nadenken.*
- L7 *Ja, maar wanneer wordt er dan iets aangepast in het DNA?*

L8 Ja, dat weet ik niet?

L7 Ja, dat kan toch niet? Je DNA verandert toch nooit meer? Na...

L8 Je eigen DNA niet.

Het is hierbij wel van belang om een tweetal eigenschappen van deze genetische veranderingen te benadrukken, namelijk de ongerichtheid en de willekeurigheid ervan.

Het is belangrijk dat leerlingen beseffen dat mutaties niet per definitie voordelig zijn. Het is zelfs zo dat verreweg de meeste mutaties resulteren in een genetische codering voor een niet functioneel eiwit. Andere mutaties hebben geen enkele invloed op het eiwit waarvoor het desbetreffende gen codeert. Bovendien worden mutaties niet opgewekt door evolutionaire druk. Het is niet zo dat de noodzaak om te veranderen tot gevolg heeft dat er mutaties ontstaan in de desbetreffende genen. Aandacht schenken aan de toevallige aard van mutaties is mijns inziens van belang omdat de kans bestaat dat leerlingen die voor het eerst kennis maken met het begrip mutatie een soort verkapt lamarckistisch redeneerpatroon ontwikkelen. Wanneer we mutaties opvatten als gerichte veranderingen in het genetisch materiaal die worden veroorzaakt door relevante omgevingsfactoren, dan is er eigenlijk weer sprake van een instructietheorie. Een dergelijk instructiemechanisme kunnen we aanduiden met de term gerichte mutagenese (zie figuur 1b).

De neodarwinistische verklaring voor soortsvorming biedt verder aanknopingspunten om een aantal denkbeelden over evolutie, die je vaak bij leerlingen tegenkomt, te bespreken. Een veelvoorkomend misverstand met betrekking tot natuurlijke selectie is het idee dat het altijd de sterkste of meest intelligente individuen zijn die overleven in de strijd om het bestaan. Dit misverstand komt mede voort uit het onzorgvuldig gebruik van termen als *survival of the fittest* en *het recht van de sterkste* in de media (zie ook pagina 6). Het begrip fitness is natuurlijk sterk gekleurd door de betekenissen die deze term in de Nederlandse taal kent. Aan de hand van natuurlijke selectie kunnen we duidelijk maken dat het voortplantingssucces uiteindelijk het enige is dat telt. Een fysiek sterk individu dat slechts twee nakomelingen voortbrengt is evolutionair gezien minder succesvol dan een zwak individu dat tijdens zijn (misschien korte) leven maar liefst vier nakomelingen produceert. In de volgende generatie zal het aandeel van de genen van het zwakke individu in de genenpool groter zijn dan het aandeel van de genen van zijn soortgenoot. Het hoeven dus ook niet altijd competitieve kenmerken zijn die door natuurlijke selectie worden bevoordeeld. Coöperatieve eigenschappen (bijvoorbeeld het delen van voedsel met soortgenoten) kunnen evengoed het voortplantingssucces verhogen.

De opvatting dat evolutie altijd grotere en complexere soorten opbrengt hangt nauw samen met bovengenoemd idee. Wanneer wij de organismen die momenteel de aarde bevolken in ogenschouw nemen en deze vergelijken met de primitieve éencelligen die 3 miljard jaar geleden op aarde voorkwamen dan wordt inderdaad de suggestie gewekt dat evolutionaire ontwikkeling in principe gepaard gaat met een toename in grootte en complexiteit. Dit is echter een misvatting. De evolutionaire geschiedenis kent immers talloze voorbeelden van soorten die veel kleiner zijn dan de voorouderlijke soort (vergelijk de vele kleine vogelsoorten eens met *Archeopteryx*, de veerdragende dinosauriër die door paleontologen wordt beschouwd als de missing link tussen de dinosauriërs en de vogels). Ook de toename in complexiteit is lang niet altijd waar (kijk maar eens naar de in zee levende zoogdieren, en de vele soorten planten en dieren die een parasitaire levenswijze hebben aangenomen).

De veronderstelling dat mutaties en andere veranderingen in het genetisch materiaal ongericht zijn laat zien dat de loop van de evolutie voor een belangrijk deel op het toeval berust. Wanneer we de evolutionaire klok zouden kunnen terugdraaien en het leven op aarde opnieuw zouden kunnen laten ontstaan, is de kans dat de soort *Homo sapiens*, of intelligent leven überhaupt miniem (Diamond, 1991). De neodarwinistische evolutietheorie spreekt dus de teleologische (doelmatige) visie die we bij veel mensen aantreffen tegen.

Tot slot. We moeten uitkijken voor een al te dogmatische behandeling van het thema natuurlijke selectie. In het lesmateriaal dat in dit hoofdstuk wordt beschreven is gekozen voor een standpunt waarbij de neodarwinistische evolutietheorie als 'waar' en een instructietheorie als 'onwaar' wordt gezien. Dit is ook het standpunt dat door de meeste studieboeken over evolutie wordt uitgedragen en het standpunt dat in het centraal schriftelijk eindexamen wordt getoetst.

Voor sommigen zal deze benadering wellicht te eenzijdig of te stellig zijn. Is de neodarwinistische evolutietheorie wel zo onomstreden? Biologen zijn het in grote lijnen eens over dat de neodarwinistische evolutietheorie één van de belangrijkste mechanismen voor evolutie moet zijn. Maar over de mate waarin natuurlijke selectie het ontstaan van soorten kan verklaren wordt hevig gediscussieerd. Een arrogante houding ten opzichte van alles wat doet denken aan een instructiemechanisme zoals dat van Lamarck is evenmin op zijn plaats (Voogt, 1994). Door allerlei mechanismen die te maken hebben met genregulatie en genexpressie is het wel degelijk mogelijk dat tijdens het leven verworven eigenschappen worden doorgegeven aan volgende generaties.

Echter, gezien de conceptuele problemen die zich voordoen bij het leren van natuurlijke selectie lijkt het niet verstandig om meteen veel nadruk te leggen op de hiaten en onzekerheden in de neodarwinistische evolutietheorie. Bij ANW ligt het natuurlijk meer voor de hand om voor een meer wetenschapsfilosofische benadering te kiezen. De elegantie (en importantie) van Darwin's selectietheorie is in ieder geval reden genoeg om hier uitgebreid aandacht aan te besteden in het voortgezet onderwijs.

Literatuur

- Baalmann, W., Frerichs, V. & Kattmann, U. (1998). How the gorillas became dark. Research in students' conceptions leads to a rearrangement of teaching genetics and evolution. Pp. 171-189 in: O. de Jong, K. Kortland, A.J. Waarlo & J. Buddingh' (eds.). *Bridging the gap between theory and practice: what research says to the science teacher*. Proceedings of the 1998 International Summer Symposium, Utrecht University, ICASE.
- Bishop, B.A. & Anderson, C.W. (1990). Student conceptions of natural selection and its role in evolution. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(5), 415-427.
- Brumby, M. (1979). Problems in learning the concept of natural selection. *Journal of Biological Education*, 13(2), 119-122.
- Brumby, M. (1984). Misconceptions about the concept of natural selection by medical biology students. *Science Education*, 68(4), 493-503.
- Clough, E.E. & Wood-Robinson, C. (1985). How secondary students interpret instances of biological adaptation. *Journal of Biological Education*, 19(2), 125-129.
- Demastes, S.S., Settlage, J. & Good, R. (1995). Students' conceptions of natural selection and its role in evolution: cases of replication and comparison. *Journal of Research in Science Teaching*, 32(5), 535-550.
- Diamond, J. (1991). *The Rise and Fall of the Third Chimpanzee*. London: Vintage.
- Geraedts, C.L. & Boersma, K.Th. (2000). Ontwikkeling van het begrip natuurlijke selectie in havo/vwo. *Tijdschrift voor Didactiek der Bètawetenschappen*, 17(2), 124-150.
- Greene, E.D. (1990). The logic of university students' misunderstanding of natural selection. *Journal of Research in Science Teaching*, 27(9), 875-885.
- Gough, N.P. (1978). The necessity of evolution: law and logic in Darwin's explanation. *Journal of Biological Education*, 12(1), 3-6.
- Halldèn, O. (1988). The evolution of the species: pupil perspectives and school perspectives. *International Journal of Science Education*, 10(5), 541-552.
- Hendrikse, M. & Boersma, K.Th. (1999). Leerlingdenkbeelden over soortsvorming. *Tijdschrift voor Didactiek der Bètawetenschappen*, 16(2), 110-129.
- Jiménez Aleixandre, M.P. (1992). Thinking about theories or thinking with theories?: a classroom study with natural selection. *International Journal of Science Education*, 14(1), 51-61.
- Stebbins, R.C. & Allen, B. (1975). Simulating evolution. *The American Biology Teacher*, 37, 206-211.
- Theunissen, B. & Visser, R.P.W. (1996). *De Wetten van het Leven. Historische grondslagen van de biologie 1750-1950*. Baarn: Ambo.
- Voogt, P.A. (1994). De moeizame weg om tot kennis te komen. *Bulletin voor Onderwijs in de Biologie*, 25 (153), 210-215.