

Hoe de slang haar poten verloor

door Eric W.A. Mulder, Natura Docet Wonderryck Twente, Denekamp
e.mulder@wonderryck.nl

Binnen de groep van de gewervelde dieren (Vertebrata) worden de slangen ingedeeld bij de reptielen. Verreweg de meeste slangensoorten leven op het land. Toch hebben ze geen poten. In de laatste decennia zijn de natuurwetenschappelijke inzichten enorm gegroeid met betrekking tot de evolutionaire en moleculair-genetische achtergronden van de afwezigheid van poten. Maar daarmee trokken slangen al de aandacht toen de eerste Bijbelverhalen werden opgetekend, ten minste ca. 2950 jaar geleden. Toen werd een groot deel van Genesis geschreven, het eerste boek van het Oude Testament (Davies, 2010). Dit opvallende verschijnsel heeft de mensheid dus al minstens drieduizend jaar geïntrigeerd.

Pootverlies als straf van God

Eén van de meest bekende, en zeker één van de meest tot de verbeelding sprekende Bijbelverhalen is de verleiding van Eva door de slang. De slang moet daarbij de duivel in vermomming voorstellen. Het verhaal staat opgetekend in hoofdstuk 3 van Genesis en het heeft talloze keren als inspiratie gediend voor schilderijen en beeldhouwwerken. In veel gevallen wordt de slang realistisch afgebeeld: zelfs de typische brede buikschubben zijn dan herkenbaar. Een prachtig voorbeeld is *'Het aards paradijs met de zondeval van Adam en Eva'*, geschilderd door Jan Breughel de Oude (1568-1625) en Peter Paul Rubens (1577-1640) (afb. 1). Een dergelijke voorstelling van zaken is vanuit Bijbels perspectief echter onjuist, zoals hieronder nader zal worden uiteengezet.



Afb. 1. Jan Breughel de Oude en Peter Paul Rubens: *Het aards paradijs met de zondeval van Adam en Eva*, voltooid in 1615, Collectie Mauritshuis, 's-Gravenhage. Foto: publiek domein.

Opvallend zijn de kunstwerken waarbij het 'reptiel' weliswaar een slangenstaart heeft, maar voor het overige een fantasiedier is. Het is voorzien van armen, borsten en een mensenhoofd. Soms zijn er in plaats van armen hagedisachtige voorpoten (!) met klauwen aanwezig (afb. 2). Dat mensenhoofd blijkt bij nadere beschouwing het spiegelbeeld van het gezicht van Eva. In de misogyne middeleeuwse cultuur werd de vrouw gezien als de bron van de erfzonde, d.w.z. als de bron van alle kwaad (Dowling & Scarlett, 2006).

Voor ons onderwerp is *'De Zondeval'* van Hugo van der Goes (± 1440-1482) het meest interessant (afb. 3). Afgezien van het vrouwenhoofd, dat is geschilderd om bovengenoemde reden,



Afb. 2. Adam, Eva en de 'slang' in een 13e-eeuwse sculptuur bij de ingang van de Notre Dame te Parijs. Toelichting in het artikel. Foto: publiek domein.



Afb. 3. Hugo van der Goes: *De Zondeval*, voltooid ca. 1467, Collectie Rijksmuseum, Amsterdam. Foto: publiek domein.

doet de gedaante van de verleider van Eva denken aan een vaaraan of krokodil. Het is een echte tetrapode. Zo komt het werk van Hugo van der Goes heel dichtbij een letterlijke interpretatie van hoofdstuk 3 van het Genesisverhaal, in tegenstelling tot schilderijen zoals die van Breughel en Rubens. Wanneer deze letterlijke interpretatie volledig zou zijn toegepast, dan had dat kunnen leiden tot een resultaat zoals in afbeelding 4. Vanwaar deze conclusie?



Afb. 4. Het moment van de verleiding van Eva bij een letterlijke interpretatie van Genesis, hfdst. 3. Potloodtekening van Monique Aarnink, Denekamp, 2016.

Volgens de Bijbelse overlevering worden Adam en Eva verbannen uit het paradijs na het eten van de verboden vrucht. Maar óók de slang wordt getroffen door de straf van God: *“et ait Dominus Deus ad serpentem quia fecisti hoc ... super pectus tuum gradieris”* (Fischer et al., 1984). Dat betekent zoveel als: *“en de Heer God zei tegen de slang: omdat jij dit gedaan hebt ... zul jij op jouw buik kruipen”*. Met andere woorden: vóórdat de slang Eva had verleid, was het dier nog in het bezit van poten! Daarmee is sprake van een interessante tegenstrijdigheid in de Bijbel, want in hoofdstuk 1 van Genesis staat immers:

“et fecit Deus ... omne reptile terrae in genere suo”; oftewel: *“en God schiep ... alle kruipende dieren op de grond naar hun aard”*; dus onveranderlijk. Wij zouden eigenlijk ook kunnen zeggen, dat de Bijbel, onbedoeld, hiermee een voorbeeld geeft van evolutie.

Nieuwe natuurwetenschappelijke inzichten

In de laatste decennia zijn er voor de evolutie van slangen uit een vierpotige voorouder steeds meer bewijzen gevonden. Dat is niet alleen gebeurd dankzij unieke fossielvondsten, maar ook dankzij ontdekkingen op het gebied van de moleculaire biologie. Deze hebben inzichten opgeleverd over de genetische ‘blauwdruk’ en



Afb. 5. *Palaeopython fischeri* Schaal, 2004, uit het Eoceen van Messel. Dit fossiel bevindt zich in het Naturmuseum Senckenberg, Frankfurt am Main. Lengte: ca. 2 m. Deze fossiele wurgslang werd genoemd naar de voormalige Duitse minister van Buitenlandse Zaken: Joschka Fischer, die zich als milieuminister van het Bundesland Hessen heeft ingezet om de wereldberoemde groeve Messel bij Darmstadt voor de wetenschap te behouden. Foto: publiek domein.

de werking van de genexpressie, om tot een verlies van de poten in combinatie met een verlengde lichaamsvorm te komen (Caldwell, 2003, Woltering, 2012, Held, 2014).

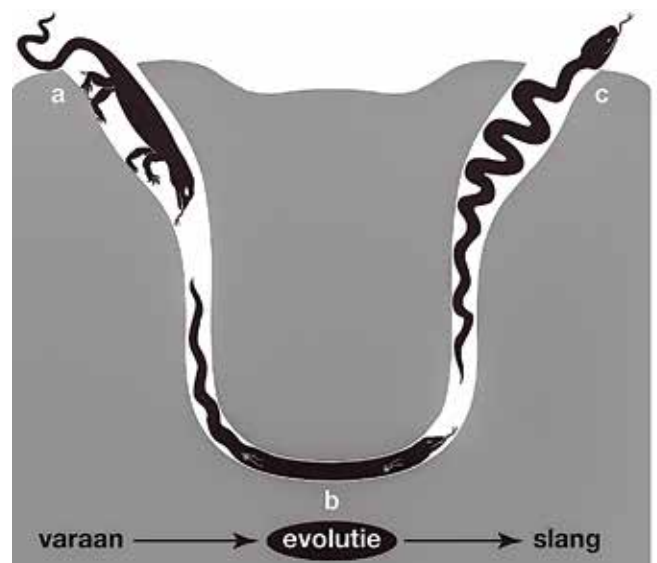
Toch kon ook reeds in de oude cultuur van het Midden-Oosten gemakkelijk het idee ontstaan dat de slang uitzonderlijk was in vergelijking met hagedissen en in het bijzonder met varanen. Overeenkomsten, zoals een gevorkte tong en een geschubde huid, kunnen, zoals we uit de Bijbel leren, 3000 jaar geleden al hebben geleid tot de aanname dat slangen ooit poten hebben gehad.

Lange tijd waren er alleen fossiele slangen bekend die lijken op levende soorten (afb. 5). Maar zeker sinds de publicatie in 1859 van Charles Darwins *‘On the Origin of Species’* werd het concept van een vierpotige slangenvoorouder logisch. Een sterke aanwijzing is natuurlijk het feit, dat bij boa’s en pythons restanten van de oorspronkelijke achterpoten zichtbaar zijn als cloaca-sporen (afb. 6) en dat resten van de bekkengordel kunnen worden gevonden in de rompmusculatuur (Zug et al., 2001).

De drijvende kracht achter de evolutie, oftewel selectiedruk, naar een pootloos verlengd lichaam is, dat de bezitters ervan gemakkelijker hun prooi (kleine knaagdieren) in gangenstelsels kunnen achtervolgen (afb. 7).



Afb. 6. Ventraal aanzicht van de overgang van buik naar staart van een vrouwelijk exemplaar van de Koningspython, *Python regius* (Shaw, 1802). Dit dier wordt als museumattractie gehouden in Natura Docet Wonderryck Twente te Denekamp. De cloaca-sporen zijn zichtbaar in de witte cirkels. De lengte van de rechter spoor in ventraal aanzicht is 0,5 mm. Foto: Gerard Beersma, Zwolle, 2016.



Afb. 7. Selectiedruk zorgde ervoor dat een varaanachtige voorouder (a) via een tussenvorm (b) evolueerde tot de slangen, zoals wij die nu kennen (c). Dit gebeurde door verlenging van de lichaamsvorm in combinatie met de reductie en het uiteindelijke verlies van de poten. Afbeelding: Lewis I. Held (2014), overgenomen met diens toestemming.

Zeer belangrijk voor ons begrip van de evolutie van slangen was de ontdekking van de ongeveer één meter lange *Pachyrhachis problematicus* (Haas, 1979) uit het Cenomaan (Laat-Krijt) van de westelijke Jordaanoever. Zoals de soortnaam aangeeft, waren er aanvankelijk moeilijkheden met de taxonomische indeling van dit fossiel. In 1997 werd door de paleontologen Michael Caldwell en Michael Lee aangetoond dat hier sprake is van een werkelijke slang, maar dan wel één die nog in het bezit is van een volledig ontwikkelde bekkengordel en articulerende achterpootjes, waarin dijbeen, scheenbeen en kuitbeen herkenbaar zijn. *Pachyrhachis* is gevonden in marien sediment. Dit versterkte een al bestaand wetenschappelijk conflict dat nog enige tijd zou voortduren: lag de oorsprong van de slangen op land of in zee? In 2006 kwam er antwoord op deze vraag. Toen verscheen een artikel met de beschrijving van een terrestrische slang uit de Argentijnse provincie Río Negro, eveneens uit het Cenomaan (Apesteguía & Zaher, 2006). Net als *Pachyrhachis* heeft deze *Najash rionegrina* (afb. 8) een bekken met achterpootjes, maar



Afb. 8. *Najash rionegrina* Apesteguía & Zaher, 2006, uit het Cenomaan van de Argentijnse provincie Río Negro. Bovenanzicht van een gedeelte van de wervelkolom: overgang van romp naar staart. Aan de rechterkant van de wervels is een aantal ribben zichtbaar. Daarachter bevindt zich een iets dikker gebogen bot. Dit is een bekkenelement: het ileum (darmbeen). Direct daaronder ligt het dijbeen (femur) met daarop aansluitend het scheenbeen (tibia). Lengte van het dijbeen: ca. 1 cm. Foto: Paleoninja, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 4.0.

bovendien een sacrum (heiligbeen). Dat betekent dat bij *Najash* de bekkengordel (nog) met de wervelkolom verbonden was. Minstens zo belangrijk was de publicatie van een slang met gereduceerde voor- én achterpootjes (compleet met vijfvingerige 'handjes' en 'voetjes'), door Martill et al. in 2015. Deze vondst werd heel toepasselijk *Tetrapodophis amplexus* genoemd: een vierpotige slang, in staat om te wurgen. Of het dier daartoe werkelijk in staat was, valt natuurlijk nog te bezien. Dit bijzondere exemplaar (met een lengte van ongeveer 20 cm) is van Aptien-ouderdom (Vroeg-Krijt). Het werd ontdekt in de Crato-Formatie van Brazilië.

Een begin in de Jura

In datzelfde jaar (2015) werden echter nog veel oudere resten beschreven: onmiskenbare wervels en schedelelementen met de typisch naar achteren gekromde tanden van slangen (Caldwell et al., 2015). Deze fossielen uit de Laat-Jura en het Vroeg-Krijt werden ontdekt in Dorset (Engeland) en in Colorado (VS) in sedimenten die zijn afgezet in een zoetwatermoeras.

Met deze vondsten is de evolutie van slangen ten minste 70 miljoen jaar ouder dan tot voort kort werd gedacht. Het fossielenbestand laat overtuigend zien dat de evolutie van slangen op

het land heeft plaatsgevonden en gepaard ging met verlenging van het lichaam en een reductie en uiteindelijk het totale verlies van de ledematen, afgezien van de overgebleven rudimenten bij boa's en pythons.

Evolutie op DNA-niveau

Hoe kon de evolutie van slangen op genetisch niveau plaatsvinden?

De genoemde anatomische veranderingen blijken vooral in gang te zijn gezet door mutaties in twee zogenaamde Hox-genen. Dergelijke stukjes DNA bepalen het basale bouwplan van een dier. Voor alle duidelijkheid: de werking van Hox-genen is bij alle gewervelde dieren hetzelfde (Nüsslein-Volhard, 2006). De bedoelde mutaties leiden aan de ene kant tot de vorming van ribben aan de halswervels. Dat belet de expressie van andere genen die de vorming van voorpoten zouden moeten regelen. Bovendien wordt in het lumbale gebied (waar normaalgesproken lendenwervels ontstaan) de vorming van ribben niet geremd, in tegenstelling tot de normale gang van zaken. Dus in plaats van lendenwervels, worden er dan juist nog meer rugwervels ontwikkeld. Hierdoor wordt de vorming van achterpoten ook tegengehouden. Daarbij is verder aangetoond dat tijdens de embryonale ontwikkeling de vorming van de wervelkolom bij slangen ongeveer vier maal zo snel gaat dan bij zoogdieren, bijv. muizen. Dit verklaart de verlenging van het lichaam: er zijn dan immers veel rugwervels gevormd, voordat de staart ontstaat (Woltering, 2012; Held, 2014).

Bijzonder is dat de vermelde mutaties tijdens de evolutie van de gewervelde dieren meer dan eens zijn opgetreden met hetzelfde effect! Binnen de groep van de reptielen is dat ook gebeurd met hazelwormen. Tijdens het Paleozoïcum hebben vele amfibieënsoorten een vergelijkbare ontwikkeling ondergaan (Caldwell, 2003). De wormsalamanders, tot voor kort vrijwel onbekend vanwege hun verborgen levenswijze, zijn de enig overgebleven soorten van een grote groep pootloze amfibieën uit het Paleozoïcum (afb. 9 en 10). En wat te denken van de paling met zijn minuscule borstvinnen en ca.150 wervels? Deze vissoort stamt af van een voorouder van meer bescheiden afmetingen, vergelijkbaar met bijvoorbeeld de baars: een vis met ca. 40 wervels en in het bezit van normale borst- én buikvinnen (Mehta et al., 2010). Mutaties in dezelfde Hox-genen hebben dus dezelfde gevolgen, namelijk in deze voorbeelden een reductie van de ledematen in combinatie met verlenging van het lichaam.



Afb. 9. De wormsalamander *Microcaecilia dermatophaga*, op de foto links van het midden de kop. Deze soort heeft een lengte van ca. 15 cm. De huidringen hebben niets met segmentatie te maken, maar hebben dezelfde functie als de verbrede buikschubben bij slangen: ze bieden houvast bij het kruipen. Wormsalamanders leven ondergronds in humusrijke bodemplagen in tropische gebieden. Ze jagen op insecten en wormen. Foto: M. Wilkinson e.a., via Wikimedia Commons, CC BY-SA 2.5.



Afb. 10. *Eocaecilia micropodia*: een wormsalamander met kleine pootjes uit de Vroeg-Jura van Arizona, VS. Lengte: ca. 15 cm. Tekening: Nobu Tamura, via Wikimedia Commons, CC BY-SA 3.0.

Evodevo

De ontwikkeling van slangen uit een vierpotige voorouder is een schoolvoorbeeld van evolutie. Het is een goed begrepen proces, dankzij de nieuwe ontdekkingen op paleontologisch en moleculair-genetisch gebied. De synthese van deze vakgebieden tot de 'evolutionaire ontwikkelingsbiologie', is de laatste decennia echt een hot item geworden en staat volop in de belangstelling. In het Engels klinkt het nóg spectaculairder: *evolutionary developmental biology*, kortweg: 'evodevo'. Wat jammer, dat ik al lang geleden ben afgestudeerd...

Dankwoord

Ik ben de redactie van Gea erkentelijk voor de nadrukkelijke uitnodiging om deze bijdrage te schrijven. Ik bedank Monique Aarnink (Denekamp), die afbeelding 4 tekende, alsook dr. Lewis I. Held, associate professor ontwikkelingsgenetica aan de Texas Tech University (Lubbock, Texas), voor de toestemming voor het gebruik van afbeelding 7 en Gerard Beersma (Zwolle) voor de collectiefotografie ten dienste van Natura Docet Wonderryck Twente. Voor dit artikel heeft dat afbeelding 6 opgeleverd.

Literatuur

- Apesteguía, S. & Zaher, H., 2006. A Cretaceous terrestrial snake with robust hindlimbs and a sacrum. *Nature* 2006 (440): 1037-1040.
- Caldwell, M.W., 2003. "Without a leg to stand on": on the evolution and development of axial elongation and limblessness in tetrapods. *Canadian Journal of Earth Sciences* 40: 573-588.
- Caldwell, M.W. & Lee M.S.Y., 1997. A snake with legs from the marine Cretaceous of the Middle East. *Nature* 1997 (386): 705-709.
- Caldwell, M.W., Nydam, R.L., Palci, A. & Apesteguía, S., 2015. The oldest known snakes from the Middle Jurassic-Lower Cretaceous provide insights on snake evolution. *Nature Communications* 2015 (6), doi:10.1038/ncomms6996.
- Davies, G.I., 2010. Introduction to the Pentateuch. In: Muddiman, J. & Barton, J. (eds): *The Oxford Bible Commentary*. The Pentateuch. Oxford University Press, Oxford: 16-52.
- Dowling, E.M. & Scarlett, W.G. (eds), 2006. *Encyclopedia of Religious and Spiritual Development*. Sage Publications, Thousand Oaks, CA, London, New Delhi: 328-329.
- Fischer, B., Frede, H.J., Gribomont, J., Sparks, H.F.D. & Thiele, W. (eds), 1984. *Biblia sacra iuxta vulgata versionem*. Deutsche Bibelgesellschaft, Stuttgart: xxxi + 1980 pp.
- Held, Jr., L.I., 2014. How the snake lost its legs. *Curious tales from the frontier of evo-devo*. Cambridge University Press, Cambridge, UK: xii + 285 pp.
- Martill, D.M., Tischlinger, H. & Longrich, N.R., 2015. A four-legged snake from the Early Cretaceous of Gondwana. *Science* 2015 (349): 416-419.
- Mehta, R.S., Ward, A.B., Alfaro, M.E. & Wainwright, P.C., 2010. Elongation of the Body in Eels. *Integrative and Comparative Biology*, 50: 1091-1105.
- Nüsslein-Volhard, C., 2006. *Coming to life. How genes drive development*. Kales Press, Carlsbad, CA: xiii + 166 pp.
- Woltering, J.M., 2012. From Lizard to Snake; Behind the Evolution of an Extreme Body Plan. *Current Genomics* 13 (4): 289-299.
- Zug, G.R., Vitt, L.J. & Caldwell, J.P., 2001. *Herpetology. An introductory biology of amphibians and reptiles*. Academic Press, San Diego, San Francisco, New York, Boston, London, Sydney, Tokyo, 2nd edition: xiv + 630 pp.

Boekbespreking

De vorming van het land. Geologie en geomorfologie, door Esther Stouthamer, Kim Cohen en Wim Hoek. Perspectief Uitgevers, 2015. ISBN 9789491269110. 434 pagina's; 233 figuren in kleur. Formaat: 17x24,5 cm. Prijs: € 49,90.

Hoe meer je weet, des te meer je ziet. Dat geldt zeker voor het landschap. Daarom is de publicatie *'De vorming van het land. Geologie en geomorfologie'* een aanwinst voor je boekenkast. Van dit naslagwerk is inmiddels een geheel herziene druk verschenen, nu met afbeeldingen in kleur en met diverse aanpassingen. Dit boekwerk is onderdeel van een grotere vierdelige reeks *'Fysische Geografie van Nederland'*, die naast *'De vorming van het land'* ook de afzonderlijk te lezen *'Landschap in de delen'* (over de landschapscomponenten), *'Landschappelijk Nederland'* (over de fysisch-geografische regio's) en *'Fysisch-geografisch onderzoek'* omvat.

Het boek - waarvan de eerste druk in 1996 bij Van Gorcum verscheen van de hand van de in 2007 overleden Henk J. A. Berendsen - leest als een studieboek, maar is daarom niet minder interessant of waardevol. Het is juist wel handig om een logische indeling te hebben, omdat deze het zoeken vergemakkelijkt en je het boek doelgericht kunt gebruiken. Ook de negen pagina's tellende index is heel handig om snel geologische en geografische begrippen te kunnen opzoeken.

Het is ook een fijn boek voor de autodidacten onder ons. De publicatie start met een uitleg van de geologische tijdschaal en een beknopte toelichting op de plaattektoniek en zeespiegel fluctuaties. Vervolgens is het boek opgedeeld aan de hand van de hoofdtijdperken en, naarmate we in meer recente tijden aanbelen, in perioden en tijdvakken. Ongeveer de helft van het boek gaat over het Kwartair (Pleistoceen en Holoceen), vanaf 2,6 miljoen jaar geleden, de periode die ons Nederlandse landschap heeft gevormd. Hierin ook aandacht voor diverse (moderne) dateringsmethoden, zoals de luminiscentiedatering (OSL), een bijzondere 'tjdklok' voor zeer recente sedimentatie. In het deel over het Holoceen komt ook de archeologie aan bod. Voor de Holocene situatie wordt gebruik gemaakt van kaarten van Peter Vos (2015), die ook zijn gepubliceerd in de *Atlas van Nederland in het Holoceen* (Uitgeverij Bert Bakker). Een bijzondere service die de uitgever biedt is dat de digitale figuren via de website www.geo-vorming.nl kunnen worden opgevraagd en dat op deze site ook onderwijsmateriaal te downloaden is. Kortom, een helder naslagwerk, leerzaam en overzichtelijk en met een schat aan basale kennis over de geografie en geologie van ons land.

Annemieke van Roekel
redactie.vanroekel@gea-geologie.nl