

Nieuw licht op *Nothosaurus* en *Archaeopteryx*

Bestraling van iconische fossielen

door Melanie During
melaniearankadominique@gmail.com

Fossielen bieden veel informatie over de geschiedenis van het leven op aarde. Evolutie is een zeer gradueel proces en het opereert op verschillende snelheden, waardoor biologische aanpassingen soms plotseling lijken te verschijnen in het incomplete fossielenbestand. De aard en natuur van zulke aanpassingen kunnen worden verklaard wanneer we de levensstijl en leefgeschiedenis van belangrijke taxa begrijpen. Uiteraard is dit afhankelijk van de mate waarin deze informatie is bewaard na hun dood en tijdens de fossilisatie.

Om de anatomische kenmerken goed te kunnen bestuderen, is een complete en driedimensionale visualisatie nodig, iets dat heel lang onmogelijk leek. Traditionele paleontologische methoden bleven altijd beperkt tot het prepareren van de fossielen, waardoor de morfologie slechts beperkt bestudeerd kon worden. Histologisch onderzoek, waarin het botweefsel van fossielen wordt bekeken, vereiste tot recent zelfs het fysiek verwijderen, en dus beschadigen, van een stuk fossiel bot. Sinds het eind van de vorige eeuw is virtueel onderzoek als een nieuwe vorm van onderzoek mogelijk; deze niet-destructieve techniek is ondertussen al niet meer weg te denken binnen de paleontologie: CT scannen (Computed Tomography: digitaal doorsneden maken). De Synchrotron microtomografie, een techniek waarbij een bundel van röntgenstraling fossiele botten op micrometer-niveau kan reconstrueren, vertegenwoordigt de meest succesvolle methode van de virtuele paleontologie door een optimale vastlegging van de kleinste botstructuren en brede toepasbaarheid.

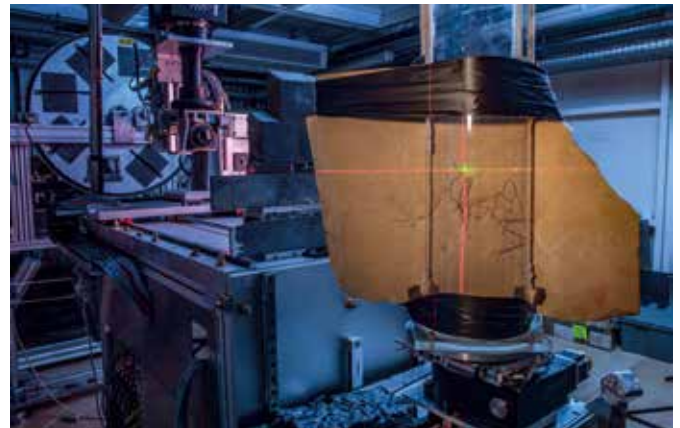
Voor zijn promotieonderzoek heeft paleontoloog Dennis Voeten – in maart 2018 gepromoveerd – synchrotron microtomografie toegepast op een 245 miljoen jaar oude *Nothosaurus* uit Winterswijk en op de 150 miljoen jaar oude *Archaeopteryx* uit Solnhofen. In dit artikel beschrijf ik de methode en zijn onderzoek naar deze twee iconische fossielen.

Deeltjesversneller

Voor medische toepassingen worden vaak röntgenfoto's gemaakt, waarbij de straling wel door het vlees gaat, maar niet door de botten. Voor CT-scans worden meerdere röntgenfoto's tot een enkele driedimensionaal beeld gecombineerd, wat flink wat computerrekenwerk vereist. De grootte is echter wel een beperkende factor; een fossiel in een steen zal minimaal een half rondje moeten draaien om alles binnen de breedte van de bundellijn van de röntgenstraling te houden. Wanneer op die wijze alle 2D-röntgenfoto's samen het hele volume van het fossiel vastleggen, kan de krachtige computer vervolgens een 3D-reconstructie maken.

Tegenwoordig biedt de deeltjesversneller van de European Synchrotron Radiation Facility (ESRF) in Grenoble (afb. 1) een grote vooruitgang. Deeltjes worden in hoge snelheid door het ronde gebouw gestuurd, waarbij magneten de elektronen hierbij in een cirkelbeweging dwingen. Het is echter onmogelijk om de vrijkomende fotonen, die zo snel zijn dat ze in het röntgenspectrum vallen, te sturen; bij elke magneet worden deze recht naar voren geschoten. Hier heeft men de zogenaamde 'beamlines' geïnstalleerd, waar de bundellijnen van röntgenstraling vervolgens benut kunnen worden. In tegenstelling tot reguliere CT-scanners voor medische toepassingen zijn deze bundellijnen niet lineair vanuit één punt, maar parallel, wat de resolutie enorm verhoogt en fouten door artefacten zoals metalen enorm verkleint. Met de korte beamline 5 en de lange, beter afstelbare beamline 19 heeft

Voeten daarmee de schedel van *Nothosaurus marchicus* en de vleugels van *Archaeopteryx lithografica* gereconstrueerd en vervolgens onderzocht.



Afb. 1. Het München-exemplaar van *Archaeopteryx* in beamline ID19 van de ESRF. De kalkstenen plaat was voorzichtig gepositioneerd op een roterend platform en de bundellijn van röntgenstraling is hier gecentreerd op de schedel met behulp van lasers. De röntgenstraling (op de foto vanuit de rechterkant) gaat door het monster heen en komt vervolgens bij de camera (zichtbaar aan de linkerkant), waar het signaal wordt geregistreerd. Foto: ESRF; Pascal Goetluck.

Nothosaurus, een pure zwemmer?

Ongeveer 7 miljoen jaar na de allergrootste massa-uitsterving ooit (eind-Perm: 252 miljoen jaar geleden) zwommen in de zeeën van Midden-Europa zeereptielen rond. Deze massa-uitsterving trof 90% van alle soorten uit de zee en 70% van alle families op het land; deze extinctie maakte het mogelijk dat nieuwe soorten zich konden ontwikkelen. Het aardoppervlak zag er toen heel anders uit dan tegenwoordig. Het supercontinent Pangaea was reeds opgebroken in de continenten die wij kennen, maar deze lagen nog veel dichter bij elkaar. Het langzaam uit elkaar drijven van deze continenten ging gepaard met aardbevingen en vulkanisme en zorgde ervoor dat het centrale deel van Europa daalde en onder water kwam te staan. Dit gebied staat ook wel bekend als het Centraal Europees Bekken - of de Muschelkalk Zee; ook onze kust, destijds in het oosten van het land, grensde aan deze zee. In de Winterswijkse Steengroeve, waar de kalksteen uit deze tijd aan het oppervlak ligt, kun je vandaag de dag nog steeds fossielen vinden van o.a. vissen en mariene reptielen. Eén van deze reptielen was *Nothosaurus*, een viseter met gebogen puntige tandjes en een lange snuit waar een vis niet makkelijk uit kon ontsnappen. *Nothosaurus marchicus* behoort tot de Sauropterygia, een groep van secundair mariene reptielen. Net als bij dolfinen en walvissen waren hun voorouders landdieren die in de loop van de tijd aangepast raakten aan het leven in water. Eén van de grote vragen die altijd speelt, is daarom ook in hoeverre *Nothosaurus* aan het leven in het water is aangepast. Dit is uiteraard een hele brede vraag en Voeten onderzocht daarom een gescande schedel van de Winterswijkse *Nothosaurus* "Gerben" om te kijken in hoeverre deze was aangepast aan de Muschelkalk Zee. Afb. 2.



Afb. 2. Reconstructie van *Nothosaurus*, door Melanie Doring.

Aan de schedel (afb. 3) valt als eerste op dat deze heel erg plat is; daarnaast is de 'endocast' (de holte waar de hersenen ooit in hebben gezeten) opvallend langwerpig en recht. Dit past heel goed bij de sterke kaakspieren die hiernaast aansluiten; de onderkaak van *Nothosaurus* begint namelijk helemaal achteraan de schedel waardoor hij, net als een krokodil, zijn bek over de hele lengte van de schedel kon openen en met veel kracht kon sluiten. *Nothosaurus* had tevens hele grote ogen in een positie die een stereoscoop of binoculair zicht mogelijk maakten, maar de beperkte spieren erachter tonen aan dat ze waarschijnlijk nauwelijks konden ronddraaien. Roofdieren hebben veelal stereoscoop zicht en kunnen daarmee goed driedimensionaal kijken; vooral naar voren en iets minder naar opzij. Prooidieren hebben de ogen vaker aan de zijkant, waardoor ze vooral goed om zich heen kunnen kijken maar niet driedimensionaal vooruit. De vorm van de hersenholte toont ook aan dat de grote hersenen, zoals zoogdieren deze hebben, bij *Nothosaurus* weinig ontwikkeld waren en de hersenen zich vooral beperkten tot het zogenaamde reptielenbrein.



Afb. 3. Reconstructie van het endocranium van *Nothosaurus marchicus* binnen de schedel, van links naar rechts: enkele tanden; het onderontwikkelde vomeronasaal orgaan (zie tekst hieronder); de grote ronde klieren waar mogelijk zout werd afgescheiden; het verlengde brein tot aan het eind van de schedel met de omhoogstekende verbinding naar het derde oog en de zenuwbanen naar de hersenstam toe. De openingen links en rechts van het derde oog zijn de postorbitale (achter de ogen) openingen waar de spieren van de onderkaak zich hechten aan de schedel. De botuitsteeksels (links en rechts hierachter) zijn de articulatiepunten met de onderkaak: hier scharniert de bek. Afbeelding uit Voeten et al., 2017.

Nothosaurus had ook een duidelijk derde oog, een zintuiglijk orgaan dat bij reptielen en hagedissen voorkomt, niet te verwarren met een echt oog. Het is een kleine opening bovenop de schedel, afgesloten met een lichtdoorlatend membraan. Het zoge-

naamde derde oog is bij ons in mindere mate ook nog aanwezig als de pijnappelklier, maar deze heeft geen lichtdoorlatend membraan meer aan het oppervlakte. De hersenholte maakt een duidelijke verbinding met dit 'pineal foramen', ofwel derde oog, dat wil zeggen dat de hormoonhuishouding waarschijnlijk via het derde oog werd gereguleerd. Deze hormoonklier reguleert processen op tijdschalen als slaap, seizoenen, puberteit en had mogelijk ook een functie bij de temperatuurhuishouding en navigatie.

Reptielen die op land leven hebben vaak een gespleten tong die door twee gaatjes in het gehemelte een 'vomeronasaal orgaan' (een intern reukorgaan) bereiken waarmee ze nog beter kunnen ruiken. Bij *Nothosaurus* zijn deze gaatjes in het gehemelte nog wel gevonden, maar het interne reukorgaan is duidelijk onderontwikkeld. Dit past heel goed bij een marien reptiel, omdat reuk onder water veel minder belangrijk is dan op het land. Daarnaast heeft *Nothosaurus* wel andere klieren vlak achter de neus die mogelijk zouden hebben gediend om zout uit het water af te scheiden, een aanpassing die vaker voorkomt bij secundair mariene vertebraten, zoals ook bij o.a. moderne stormvogels en zeeleguanen.

Nothosaurus marchicus behoort tot één van de oudste vertegenwoordigers van het genus *Nothosaurus*, maar uit het hiervoor beschreven onderzoek naar de schedel komt naar voren dat hij al duidelijk een schedelarchitectuur heeft van een goed aangepaste zwemmer. Dit visetende roofdier leefde daarom waarschijnlijk in kustnabije ondiepe wateren, waar het vissen belaagde en aan het oppervlak kwam om te ademen.



Afb. 4. Het München-exemplaar van *Archaeopteryx*. Dit bestaat uit een gedeeltelijke schedel (bovenin links), de schouderregio en beide vleugels zijn lichtelijk omhoog gericht (van het meest links tot centrum links), links hiervan bevindt zich de ribbenkast met daarnaast de heupgordel en beiden benen in een 'fietsende' houding (rechts); allemaal verbonden aan de ruggraat van de nek (bovenin links, onder de schedel) tot het puntje van de staart (meest rechts). Afdrukken van de vleugelveren zijn zichtbaar als een waaier van onder de schouder en een zwakke afdruk van de staartveren reikt van onder het eind van de staartwervels (rechtsonder). Foto : ESRF, Pascal Goetluck.

Vloog *Archaeopteryx*?

De vraag of de vliegende dinosauriër *Archaeopteryx* uit het Jura-tijdperk kon vliegen, houdt paleontologen al decennialang bezig. *Archaeopteryx* wordt vaak gezien als de verbindende schakel tussen dinosauriërs en vogels, maar er was al die tijd geen bewijs voor het vermogen om te vliegen. Kon *Archaeopteryx* vliegen, en zo ja, hoe? Hoewel het vaststaat dat de huidige vogels afstammen van de dinosauriërs, blijven nog veel vragen over de vroege evolutie van vogels en hun vlucht onbeantwoord. Fossiele skeletten van *Archaeopteryx* zijn bewaard in en op kalkstenen platen, die de fossiele anatomie slechts gedeeltelijk onthullen. Omdat deze fossielen zeer waardevol zijn, wordt het verwijderen van stukken bot voor onderzoek ontmoedigd. Daarom heeft men met traditionele onderzoeksmethoden nog niet kunnen vaststellen of *Archaeopteryx* kon vliegen. Met behulp van de hierboven

genoemde synchrotron microtomografie bij de ESRF zijn Voeten en zijn collega's in staat geweest tot in de botten van *Archaeopteryx* te kijken en zijn ze hierdoor meer te weten gekomen over het gedrag van deze vroege vogelsoort. Afb. 4.

Het reconstrueren van uitgestorven gedrag dat bij levende soorten niet meer voorkomt, is een uitdaging voor paleontologen, in het bijzonder als het gaat om raadselachtige dieren zoals de *Archaeopteryx*. Deze vogelachtige uit het Laat-Jura van Beieren in Zuidoost-Duitsland wordt beschouwd als de oudst mogelijke vrij vliegende dinosauriër. Dit goed geconserveerde fossiele dier heeft een overgangsmorfologie die nauwe familiebanden suggereert tussen de uitgestorven dinosauriërs en levende dinosauriërs, de vogels. De skeletten van de meeste moderne vogels zijn gespecialiseerd in actieve vlucht (in tegenstelling tot passieve vlucht: het zweven) maar veel van deze aanpassingen, in het bijzonder in het schoudergewricht, zijn afwezig in de Beierse fossielen van *Archaeopteryx*. Hoewel hun gevederde vleugels lijken op die van de moderne vogels, weten we inmiddels dat de anatomie van de schouder niet geschikt was voor de vleugelslag van moderne vogels.

Incidentele vlieger

De uiterlijke vorm van de botten van een dier geeft al vaak een indruk, maar ook de doorsnede is een belangrijke bron van informatie. Botten met een hele dikke wand behoren vaak tot landdieren of zelfs tot waterdieren; hoe dunner die wand, hoe lichter de botten zijn. Vogelbotten zijn heel erg licht, met een dunne wand en vaak hol van binnen. Deze dunne botten moeten echter wel sterk zijn om de krachten die bij het vliegen op de botten worden uitgeoefend te kunnen weerstaan. De evolutionaire selectie om een optimale kracht bij minimale botmassa te realiseren, en daarnaast functionele aanpassingen aan de krachten die optreden tijdens het leven, bepalen de vorm van de dwarsdoorsnede van de botten. Functionele aanpassingen zijn vaak afhankelijk van de veelvoorkomende bewegingen, zoals bijvoorbeeld de rechterarm van een tennisspeler vaak een dikkere botwand heeft; in dit geval bepaalt het type vlucht de aanpassing aan de botten. De krachten die de botten van vogels aan moeten kunnen, zijn afhankelijk van de vliegbevingen en vliegstrategie; deze factoren zullen de vorm van de botten beïnvloeden.



Afb. 5. Een virtuele reconstructie van het opperarmbeen, spaakbeen en de ellepijp van het 'Chicken Wing'-exemplaar van *Archaeopteryx*. Afbeelding door Dr. Dennis Voeten.

De dwarsdoorsneden van de vleugelbotten van meerdere exemplaren van *Archaeopteryx* (afb. 5) zijn in het onderzoek van Voeten daarom statistisch vergeleken met de vleugelbotten van

allerlei moderne vogelsoorten met verschillende vliegstrategieën, vleugelbotten van pterosauriërs, en met de (vaak dikke) armbotten van (niet-vliegende) dinosauriërs en krokodillen. Deze vergelijking liet zien dat de botten van *Archaeopteryx* het meest lijken op moderne vogels die slechts af en toe vliegen, zoals fazanten en kippen, bijv. om een roofdier te ontwijken. De botten van *Archaeopteryx* bleken helemaal niet te lijken op de dikke botten van dinosauriërs, maar ook niet op langdurige vliegers zoals zeevogels of roofvogels.

Vliegen in een archipel

Het gebied rondom het Zuid-Duitse stadje Solnhofen was ongeveer 150 miljoen jaar geleden een tropische archipel van kleine eilandjes; het moet een ideaal gebied voor *Archaeopteryx* geweest zijn, die zich met zijn primitieve vliegvermogen van eiland naar eiland kon verplaatsen (afb. 6). Tegelijkertijd was



Afb. 6. Reconstructie van een vliegende *Archaeopteryx* door Jana Růžičková.

Archaeopteryx daar absoluut niet de enige vlieger. Hij deelde zijn leefgebied met primitieve pterosauriërs, vliegende reptielen die uiteindelijk zouden evolueren tot de gigantische pterosauriërs van het Krijt. De verschillen in de botarchitectuur van primitieve en gespecialiseerde pterosauriërs waren tevens vergelijkbaar met de verschillen tussen kortdurig actief vliegende en langdurig glijdende vogels. Dit wil zeggen dat, zowel primitieve pterosauriërs en *Archaeopteryx*, al dan niet op dezelfde manier, kortdurig en incidenteel vlogen, wat in contrast staat met de geavanceerde vlucht van de gespecialiseerde pterosauriërs en moderne vogels (afb. 7).



Afb. 7. Dennis Voeten toont de dikte van de botwand van het opperarmbeen van het 'Chicken Wing'-exemplaar van *Archaeopteryx* op het bovenste scherm. Het onderste scherm toont het bot van een primitieve pterosauriër. Een driedimensionaal model van het 'Chicken Wing'-exemplaar wordt omhoog gehouden; het bot op het bovenste scherm komt overeen met het meest rechtse bot in het model. Foto: ESRF.

Omdat *Archaeopteryx* de oudst bekende vliegende vertegenwoordiger is van een groep van vleesetende dinosauriërs waartoe ook de huidige vogels behoren, geven deze onderzoeksresultaten ons niet alleen meer inzicht in de levensstijl van *Archaeopteryx*, maar ook in de vroege evolutie van vliegende dinosauriërs in het algemeen. Immers, als er 150 miljoen jaar geleden een dinovogel zelfstandig rondvlog, zou dit kunnen betekenen dat vliegende dinosauriërs nog eerder moeten zijn ontstaan. Aangezien de botten van *Archaeopteryx* al aangepast zijn voor vlucht is het namelijk zeer aannemelijk dat er nog oudere dinosauriërs kunnen zijn die deze eigenschap ook al hadden of aan het ontwikkelen waren. Omdat de schouder van de *Archaeopteryx* echter helemaal niet geschikt is voor de moderne vleugelslag, zal de vliegtechniek heel anders zijn geweest. De vleugelbotten van dit Beierse icoon der evolutie waren geschikt voor actieve gelegenhedsvluchten, maar niet voor de luchtacrobatiek van veel hedendaagse vogels.

Link naar publicaties

- <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0188509> en
- <https://www.nature.com/articles/s41467-018-03296-8>

Dit artikel is gebaseerd op het promotieonderzoek van Dr. Dennis Voeten. De volledige titel van het proefschrift luidt: 'Synchrotron Microtomography of Diapsids'.