



AFBEELDING 1: | Transparant gevisualiseerde kamer aan het einde van een graafgang uit het Vroege Trias van Zuid-Afrika met daarin de volledig bewaard gebleven skeletten van de cynodont *Thrinaxodon* (rood) en het amfibie *Broomistega* (donkergrijs).

# Synchrotronlicht op unieke fossielen

DENNIS F. A. E. VOETEN<sup>1,2,3</sup>  
MELANIE A. D. DURING<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UPPSALA UNIVERSITY,

<sup>2</sup>EUROPEAN SYNCHROTRON  
RADIATION FACILITY,

<sup>3</sup>NATURALIS BIODIVERSITY CENTER

We schrijven vrijdag 8 november 1895. Tegen het einde van de middag experimenteerde Wilhelm Röntgen in zijn verduisterde laboratorium aan de Universiteit van Würzburg met ontladingsbuizen. Deze vacuüm getrokken glazen pijpjes creëren een elektrostatisch veld als ze onder spanning worden gezet. Vanuit zijn ooghoeken zag Wilhelm achterin de kamer een met bariumzout bedekt scherm vaag opgloeien. De daaropvolgende realisatie dat dit fluorescentiescherm een onzichtbare straling moet hebben omgezet in zichtbaar licht markeerde de ontdekking van röntgenstraling. Wilhelm raakte geïntrigeerd door de eigenschappen van deze nog onbekende straling die in zekere mate door botten leek te worden geblokkeerd maar klaarblijkelijk ongehinderd door spier- en bindweefsels kon passeren. Door het schijnsel van het fluorescentiescherm op een fotografische plaat vast te leggen maakte Wilhelm enkele maanden later ook de eerste röntgenfoto van een hand. Hoewel röntgenfotografie sinds november 1895 continu is verbeterd, bleven de onderliggende principes in grote lijnen onveranderd.

## Virtuele paleontologie

Röntgenonderzoek is een van de disciplines die wordt aangewend om

‘virtuele paleontologie’ te bedrijven: het bestuderen van fossielen met behulp van driedimensionale visualisa-



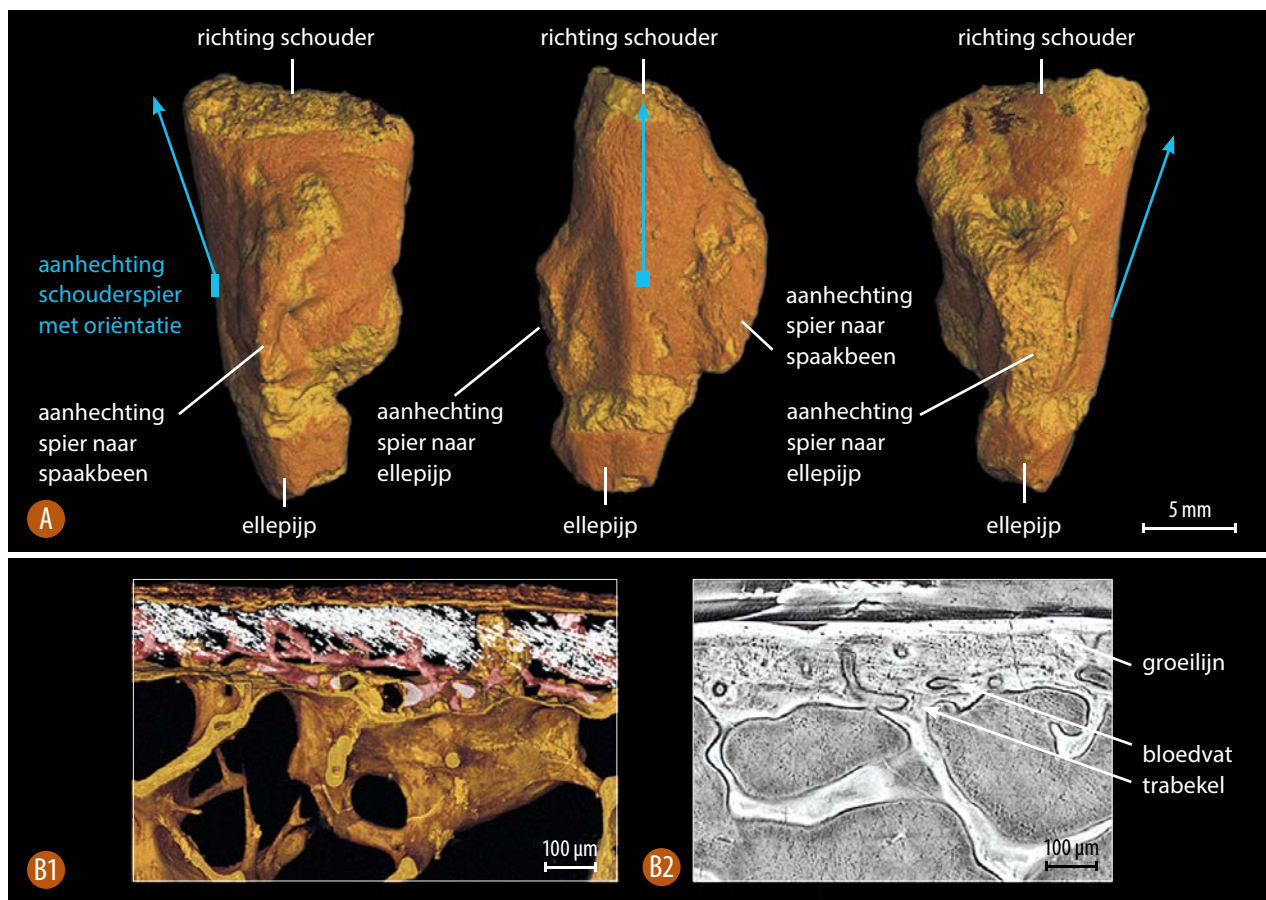
tietechnieken. In de jaren 60 en 70 van de vorige eeuw kwamen geautomatiseerde opstellingen beschikbaar die meerdere röntgenfoto's, genomen vanuit verschillende hoeken, combineerden tot een driedimensionaal model van ondoorzichtige objecten. Dergelijke instrumenten werden voor medische doeleinden ontwikkeld maar al snel geadopteerd door andere vakgebieden. De voordelen voor paleontologisch onderzoek waren meteen duidelijk. Waardevolle en breekbare fossielen hoefden niet altijd meer beschadigd te worden tijdens de beschrijving van interne structuren. Tevens kon de röntgendata overal bestudeerd worden zonder dat de fossielen voortdurend in musea bezocht hoefden te worden. Tot slot gaf de zogenaamde computertomografie (CT) ongekende mogelijkheden voor het weergeven en animeren van fossiele resten, in veel gevallen zelfs zonder dat deze fysiek uit het moedergesteente waren bevrijd.

### Synchrotron microtomografie

Naast verbeteringen in de manier waarop röntgenschaduwen worden vastgelegd en vertaald naar driedimensionale modellen, werden ook de stralingsbronnen doorontwikkeld. Deeltjesversnellers accelereren geladen deeltjes met behulp van elektrische velden tot bijna de lichtsnelheid waarna magnetische sturing wordt gebruikt om deze in een cirkelvormige baan vast te houden. Een destijds ongewenst neveneffect is dat hierbij hoogenergetische straling vrijkomt. Men realiseerde zich echter dat dit parasitaire effect kan worden uitgebuit voor het creëren van ongekend nauwkeurige stralingsbronnen. Vervolgens werden synchrotrons ontwikkeld die krachtige elektromagnetische straling beschikbaar maken voor een groot scala aan toepassingen. Een synchrotron stuurt pakketjes elektronen rond in een vacuüm waarbij de vrijgekomen synchrotronstraling via bundellijnen naar laboratoria wordt geleid. Hier kan de straling worden gefocust en kunnen de gewenste bandbreedten worden uitgefilterd. In het geval van com-

putertomografie wordt een object in de straal op een draaitafel geplaatst en doorgestraald. Het verkregen stralingsbeeld wordt vervolgens omgezet in zichtbaar licht en vastgelegd door een digitale camera die per rotatie van het monster duizenden röntgenfoto's maakt. De röntgenfoto's vormen de basis voor de tomografische reconstructie waarin de dichtheidsverschillen binnen het object als verschillende grijstinten in een dossier van opeenvolgende afbeeldingen zijn gedocumenteerd.

Het gebruik van een synchrotron als stralingsbron heeft enkele belangrijke voordelen ten opzichte van traditionele tomografische oplossingen. Zo zendt de synchrotron beduidend meer fotonen uit dan een conventionele stralingsbron, waardoor het mogelijk is om een beperkte elektromagnetische bandbreedte uit te filteren. Dit voorkomt dat een röntgenfoto aan scherpte verliest door de variërende interferentie van verschillende



AFBEELDING 2. | A. Opperarmbeen en ellepijp van de vis *Eusthenopteron* als 3D weergave met spieraanhechtingen aangegeven. B1. Virtuele 3D doorsnede door de bothuid in het opperarmbeen van *Eusthenopteron* met door spieraanhechting georiënteerde vezels (wit) zichtbaar tussen de bloedvaten (roze) in het bot (bruin) ter hoogte van het blauwe vierkant in (A). B2. Virtuele 2D doorsnede ter hoogte van B1 met groeilijn, bloedvat, en trabekel (versteving van het inwendige bot) aangegeven. De bothuid laat duidelijk de oriëntatie van de botstructuren zien. Afbeelding aangepast van Sanchez et al., 2013.



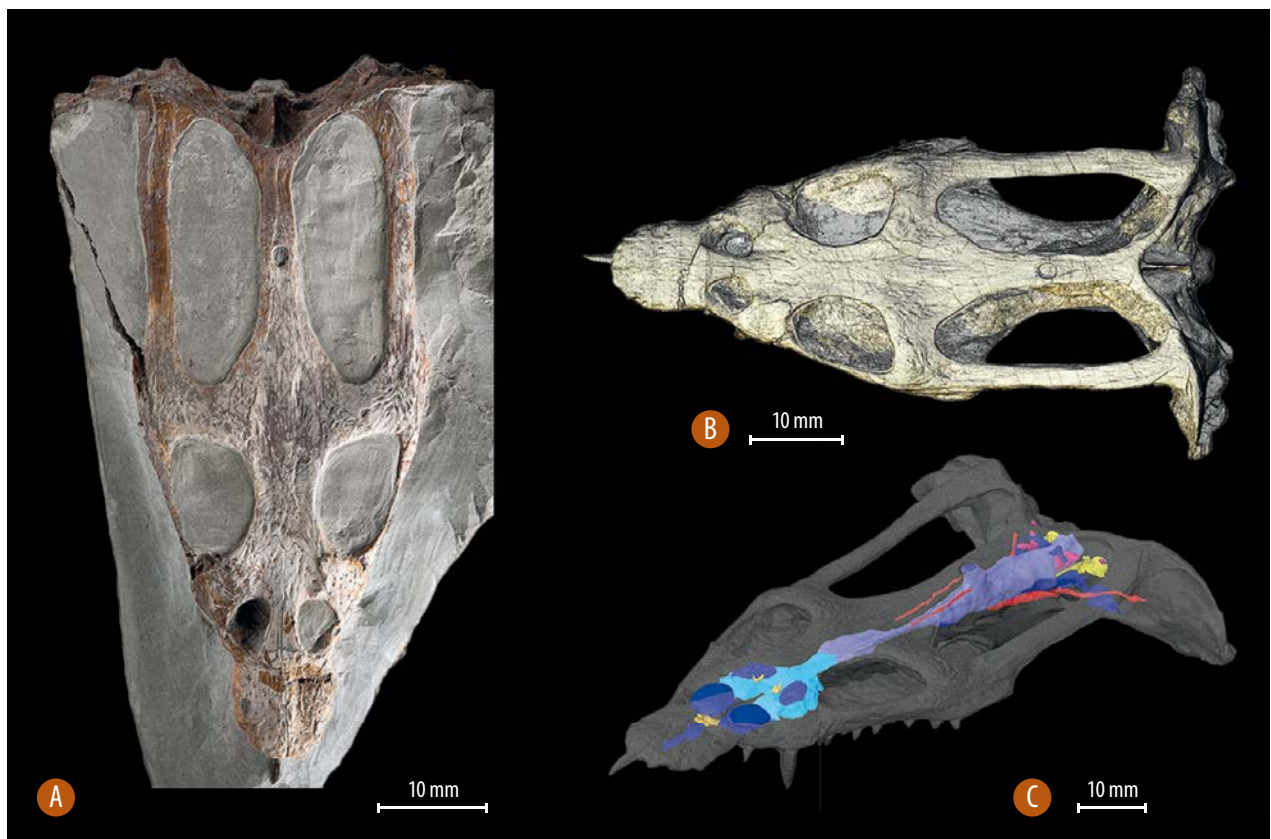
röntgenfrequenties met de inwendige samenstelling van het object. Verder maakt de hoge energie van synchrotronstraling het mogelijk om dickere fossielen door te lichten. Daar waar de synchrotron een parallelle stralingsbundel produceert, gebruiken andere opstellingen meestal een kegelvormige stralingsgeometrie die vervormingen in stralingsbeeld geeft. Hierdoor zijn driedimensionale volumes veel eenvoudiger en nauwkeuriger te reconstrueren met behulp van een synchrotron. Het belangrijkste voordeel vloeit echter voort uit het gegeven dat binnen een synchrotronbundel de golven allemaal in fase lopen. Met fasecontrast-tomografie kunnen niet alleen de absorptieschaduwen maar ook de variërende refracties tussen de verschillende materialen in het object worden vastgelegd. Als de coherente bundel een overgang tussen twee media passeert, zal de fase van de stralen iets verschuiven. Door de detector op enkele meters van het object te plaatsen kunnen deze subtiele faseverschuivingen zich ontwikkelen en worden zelfs subtiele begrenzingen tussen media met vergelijkbare dichtheden zichtbaar. De laatstgenoemde

fasecontrast-techniek geeft synchrotron microtomografie een superieur contrast ten opzichte van andere tomografische technieken en leent zich uitzonderlijk goed voor het visualiseren van relatief grote fossielen met slechts beperkte interne dichtheidsverschillen. We presenteren hieronder graag enkele voorbeelden van paleontologische onderzoeken die werden mogelijk gemaakt door synchrotron microtomografie.

### Een nat pak: de vroegste viervoeters

Tijdens het Devoon ontstonden uit vissen de eerste tetrapoden (viervoeters). Deze overgang voltrok zich waarschijnlijk niet slechts éénmaal, maar lijkt een langdurig experiment op de overgang van nat naar droog te zijn geweest. In dit experiment vinden we *Eusthenopteron*, een nauwe verwant van de vroegste viervoeters. Het skelet van *Eusthenopteron* lijkt in vele opzichten al sterk op dat van vroege tetrapoden. Zo zijn in de vinnen van *Eusthenopteron* al duidelijk de voorlopers van het opperarmbeen, spaakbeen, ellepijp, dijbeen, scheenbeen, en kuitbeen te herkennen.

Uit fysieke slijpplaatjes was al bekend dat de inwendige structuren van spier-aanhechtingen in fossiele botten bewaard konden blijven, maar hun driedimensionale organisatie bleef onduidelijk. Tevens is het vaak lastig om curatoren te overtuigen dat het maken van een slijpplaatje noodzakelijk is voor het bestuderen van de fossielen in hun collectie - die schade maak je niet meer ongedaan. Met behulp van synchrotron microtomografie is het mogelijk om de spieraanhechtingen van deze botjes in 3D te karteren (Sanchez *et al.*, 2013). Er werd ingezoomd op de spieraanhechtingen in de opperarmbeenderen van twee 380 miljoen jaar oude fossielen vissen, namelijk die van de gepantserde kaakvis *Compagopiscis croucheri* en die van de kwastvinnige *Eusthenopteron foordi*. Het bleek dat de spieraanhechtingen in deze fossielen al op dezelfde manier georganiseerd waren als die van de moderne salamander *Desmognathus* en middels hun oriëntatie de richting van de uitgeoefende spierkracht vastleggen.



AFBEELDING 3. | Schedel van *Nothosaurus marchicus* uit de Winterswijkse Steengroeve in bovenaanzicht als foto (A) en oppervlaktemodel (B). Met behulp van synchrotron microtomografie konden de inwendige holten in de schedel zichtbaar gemaakt worden en de vorm van de hersenen, bloedvaten, en zintuiglijke organen gereconstrueerd worden (C).



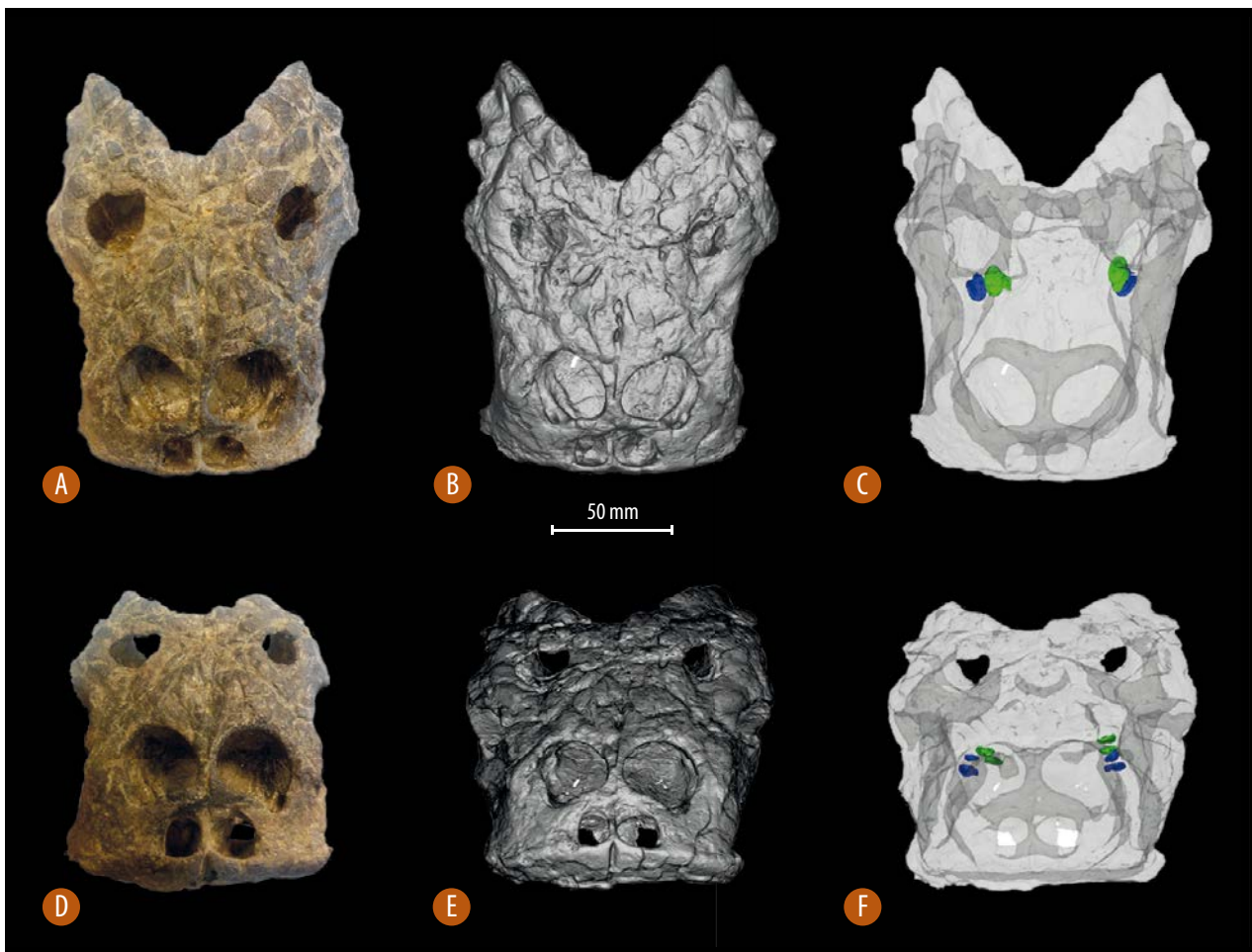
## Overlevers van de Perm-Trias massa extinctie

Het massale uitsterven aan het einde van het Paleozoïcum, zo'n 252 miljoen jaar geleden, markeerde de grootste catastrofe in de geschiedenis van het leven waarin 95% van het zeeleven, circa 70% van de gewervelde landdieren, en meer dan 30% van de insectenrijkdom uitstierf. Toch maakte deze ongekeerde reductie in biodiversiteit ook de weg vrij voor het volgende evolutionaire hoofdstuk: het "Tijdperk van de Reptielen".

Het Mesozoïcum is het meest bekend door de explosieve ontwikkeling en daaropvolgende dominantie van dinosauriërs in continentale ecosystemen. Toch verschenen de eerste dino's relatief laat op het toneel. In het begin van het Mesozoïcum vinden we al wel een rijkdom aan cynodonten (letterlijk "hondentanden") waarbinnen later, rond het begin van het Jura, de 'echte' zoogdieren ontstonden.

Een mogelijke aanwijzing voor de wijze waarop onze verre voorouders de eind-Perm extinctie hebben overleefd werd gevonden door de synchrotron-studie van een unieke steen uit het Vroege Trias van Zuid-Afrika. Deze steen vormt de opvulling van een ondergrondse kamer aan het einde van een graafgang waarin slechts de vage omtrek van een schedeldak zichtbaar was. Tomografisch onderzoek bij de Europese Synchrotron ("European Synchrotron Radiation Facility" in Grenoble, Frankrijk) bevestigde niet alleen dat de oorspronkelijke holte het bestbewaarde skelet van de cynodont *Thrinaxodon* bevat, maar dat er tevens een gaaf exemplaar van het amfibie *Broomistega* in dezelfde kleine kamer aanwezig was. Op basis van de sedimentvulling van de kamer, de preservatie van de dieren, en de lokale omstandigheden destijds, werd geconcludeerd dat *Thrinaxodon* zich had ingegraven voor een 'zomerslaap' om de lange, warme, droge

periode te overleven. Vervolgens zocht het gewonde amfibie in het begin van het natte seizoen toevlucht in het hol van *Thrinaxodon*. Rond dit moment werden de dieren verrast door het opkomende water, waarbij het hol werd overspoeld en gevuld met sediment. Het is onduidelijk of de *Thrinaxodon* nog in diepe slaap verzonken was en daarom de *Broomistega* naast zich dulde, of dat verdrinking van *Thrinaxodon* binnen enkele dagen werd gevolgd door de invasie en het overlijden van de *Broomistega*. Desalniettemin vormde deze vondst een uitzonderlijk sterk voorbeeld van gefossiliseerd gedrag. Het graven van een hol voor een langdurige 'zomerslaap' door de cynodont biedt daarbij een mogelijke verklaring voor het succesvolle overleven van de eind-Perm uitstervingsgolf door zoogdierachtige reptielen. De afmetingen van de steen zelf in combinatie met het vereiste detail van de individuele botjes maakten dat dit onderzoek alleen met een synchrotron kon worden uitgevoerd.



AFBEELDING 4. | Schedel van de placodont *Henodus* in bovenaanzicht (A,B,C) en vooraanzicht (D,E,F) als foto (A,D), oppervlaktemodel (B,E), en transparant model met functionele maalkiezen en wisseltanden in de bovenkaak (groen) en onderkaak (blauw) weergegeven (C,F).

## Triasreptielen kozen het ruime sop

Na het Perm was niet alleen het leven op aarde voorgoed veranderd. Ook het supercontinent Pangea, dat werd omringt door de kilometersdiepe Panthalassische Oceaan, begon langzaam op te breken. Hierbij daalden grote delen van de continentale korst in wat tegenwoordig Centraal- en Oost-Europa is. Dit Germaanse Bekken overstroomde geleidelijk, waarmee de ondiepe Muschelkalkzee ontstond. Door de ecologische leegte na het grote uitsterven circa vijf miljoen jaar eerder vormde dit habitat een kraamkamer voor nieuwe groepen aquatische reptielen. In een geologisch oogwenk waren uit landlevende voorouders de Sauropterygia (“hagedis-vleugeligen”) ontstaan die van meet af aan een monopolie op de kustnabije wateren lijken te hebben ingenomen. Onder de vroegste sauropterygiërs behoorden reeds schelpenkrakende placodonten, garnaal-etende pachypleurosauriërs, visetende nothosauriërs, en meer op open water gerichte pistosauriërs waar later de plesiosauriërs uit voort zouden komen.

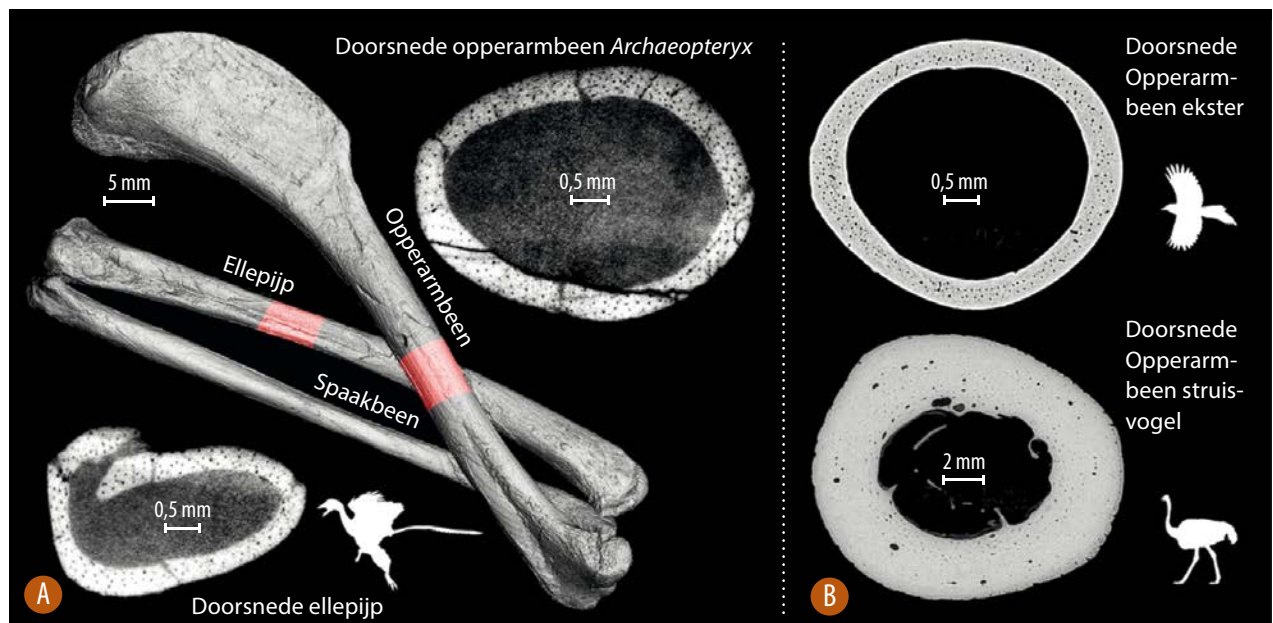
Studie van een *Nothosaurus*-schedel uit de Winterswijkse Steengroeve bij de Europese Synchrotron liet zien dat deze relatief snelle diversificatie gepaard ging met verre gaande ecologische specialisatie (Voeten *et al.*, 2018). Zo bleek dat het orgaan van

Jacobson in het gehemelte van de snuit, waar bijvoorbeeld slangen hun gevorkte tong tegenaan drukken om ‘in stereo’ te kunnen ruiken, bij *Nothosaurus* al was gereduceerd om plaats te maken voor de vervaarlijke vangtanden. Nog opvallender was dat de hersenen, die bij de meeste viervoeters een subtiele S-vorm beschrijven, in *Nothosaurus* in een kaarsrechte lijn gedrukt werden om ruimte te maken voor de massieve kaakspieren. Samen met de naar boven gerichte ogen wijzen deze aanpassingen er op dat *Nothosaurus* zijn prooi met een snelle beweging vanuit een laaggelegen hinderlaag verschalkte. Ook werden indicaties gevonden dat het goed ontwikkelde ‘derde oog’ waarschijnlijk een belangrijke functie vervulde. Dit lichtgevoelige orgaan dirigeerde hormonale processen onder invloed van dagelijkse en seizoenale fluctuaties in lichtinval en vervulde mogelijk zelfs functies in navigatie. De relatie tussen de pijnappelklier en pigmentproductie in sommige viervoeters maakt het zelfs niet ondenkbaar dat *Nothosaurus* kon schakelen tussen een lichtere kleur, als camouflage tegen de kalkrijke zeebodem, en een donkere kleur die de opname van zonnewarmte versnelt. Tot slot bleek dat de bewuste *Nothosaurus*-schedel zowel kenmerken van onvolgroeide als uitgegroeide dieren in zich verenigde. Dit wijst op een complex samenspel van ontwikkelingspatronen die waarschijnlijk bij hebben gedragen aan de relatief snelle evolutionaire transformatie van landlevende voorouders tot efficiënte viseter. Omdat de dichtheden van de fossiele schedel en het omliggende kalksteen erg dicht bij elkaar liggen, was het al snel duidelijk dat het beschreven onderzoek niet mogelijk was geweest zonder synchrotron fasecontrast-tomografie.

Het wisselpatroon van de tanden in de placodont *Henodus*, een ver familielid van *Nothosaurus*, kon met behulp van fasecontrast-tomografie zichtbaar gemaakt worden zonder de onderkaak van de schedel te scheiden (Pommery *et al.*, 2021). Dit onderzoek toonde aan dat dit dier slechts vier maalkiezen bezat, waarbij onder elke functionele tand reeds een wisseltand klaar stond om ten alle tijde een optimaal kauwoppervlak beschikbaar te hebben.

## Gevederde dinosauriërs in vogelvlucht

*Archaeopteryx* is een gevederde dinosauriër uit het Laat-Jura van Zuid-Duitsland waarvan de iconische fossielen allemaal beroemde museumstukken vormen. Deze fragiele skeletjes kunnen niet worden uitgerepareerd zonder het materiaal te beschadigen en daarom blijven veel eigenschappen van dit engimatische dier verhuuld. Hoewel *Archaeopteryx* al 150 jaar bekend staat als het oudste gevederde dier dat kon vliegen, blijft deze interpretatie onverminderd contro-



AFBEELDING 5. | A. 3D model van het armskelet van *Archaeopteryx* met virtuele doorsneden van oppeerarmbeen en ellepijp genomen op de roodgemarkeerde lokaties. B. De relatieve botdikte van het oppeerarmbeen van *Archaeopteryx* lijkt sterk op die van de ekster maar niet op die van de struisvogel.



versieel. Alle *Archaeopteryx* fossielen zijn in en op kalkstenen platen bewaard die met een conventionele scanner haast niet te verwerken zijn. Bij de Europese Synchrotron werd duidelijk dat de vleugelbotten van *Archaeopteryx* meer overeenkomsten vertonen met die van hedendaagse vogels dan tot dan toe werd aangenomen (Voeten *et al.*, 2018). Statistische vergelijking liet zien dat de 'holheid' van deze elementen (de verhouding tussen de dikte van de botwand en de volledige doorsnede van het bot) overeen komt met die van vliegende vogels, maar niet die van landlevende dino's en vluchtloze vogels. De botten van *Archaeopteryx* waren overigens nog niet aangepast aan de wringspanning die optreedt in botten van vogels die vaak of langdurig fladderen of zweven. Op basis hiervan werd geconcludeerd dat *Archaeopteryx* wel degelijk in staat was tot actieve vlucht, maar dit slecht incidenteel deed – net als moderne hoenderachtigen of bijvoorbeeld de renkoekoek.

Een ander onderzoek bij de Europese Synchrotron richtte zich op een merkwaardig dinosaurusskelet dat decennia geleden illegaal in Mongolië was opgegraven en sindsdien in verscheidene privécollecties had rondgezworven (Cau *et al.*, 2017). De bizarre anatomie van het dier en het overduidelijk gerestaurerde exterieur van het fossiel deden vermoeden dat het om een chimaera zou kunnen gaan, oftewel een fossiel dat is opgebouwd uit resten van verschillende dieren. Met synchrotronvisualisatie kon worden vastgesteld dat het fossiel, hoewel langs breuken in elkaar gezet, wel degelijk uit botten van één enkel individu bestaat. Verder bleken de unieke tanden samen met een mogelijk voelorgaan in de snuit en de vorm van de voorpoten aanwijzingen te bieden voor een amfibische levensstijl. Uit de bizarre anatomie kwam verder naar voren dat het hier om één van de meest primitieve dromaeosauriërs (die groep die populair bekend staat als "raptors") moest gaan. Het dier werd *Halszkaraptor escuilliei* genoemd naar zowel de beroemde Poolse paleontologe Halszka Osmólska als naar handelaar François Escuillie die het fossiel onder de aandacht van Belgische wetenschappers bracht.

### Komt een *Australopithecus* bij de dokter

Synchrotronlicht wordt ook steeds vaker gebruikt voor onderzoek naar onze uitgestorven familieleden. In 2008 werden de eerste resten van *Australopithecus sediba* ontdekt in een grotstelsel bij Malapa, zo'n 50 kilometer ten noordwesten van Johannesburg. In dit grotstelsel zijn inmiddels al meer dan 220 fossiele fragmenten van tenminste zes individuen gevonden. De huidige inschatting is dat *A. sediba* evolutionair tussen *Australopithecus africanus* en het geslacht *Homo* moet worden geplaatst, al blijven de exacte relaties vooralsnog onbekend. Opvallend is dat het hersenvolume van *A. sediba* niet noemenswaardig was toegenomen ten opzichte van *A. africanus*. *A. sediba* liep al wel op twee benen maar het skelet vertoonde nog veel aanpassingen aan het klimmen in bomen.

Het eerstgevonden individu van *A. sediba* was waarschijnlijk een jongen van ongeveer 12 jaar oud. Onderzoekers ontdekten al snel dat er met één van zijn middelste borstwervels iets merkwaardigs aan de hand was. In deze wervel

bevindt zich een holte die daar niet thuis hoort. Rond dit gat bevindt zich een verdikte botrand die wel wat weg heeft van een botwoekering, hetgeen er op zou wijzen dat een lichaams eigen reactie op een aandoening was opgetreden.

Om deze afwijking goed te kunnen analyseren moest de interne structuur van de wervel beter bekeken worden. Doormiddel van synchrotronvisualisatie bij de Europese Synchrotron in Grenoble kon er een diagnose worden gesteld (Randolph-Quinney *et al.*, 2016). De afwijkende wervel van onze prepuber vertoonde de kenmerken van zowel botverdichting als botverlies, en wees daarmee op een chronisch en actief ziektebeeld ten tijde van zijn dood. Op basis hiervan werd geconcludeerd dat de jonge knul vermoedelijk aan bottumoren leed die hem behoorlijk wat rugpijn moeten hebben bezorgd en mogelijk zelfs spasmes veroorzaakten. Deze aandoening zal hem hoogstwaarschijnlijk ook bij het klimmen in de weg gezeten hebben.

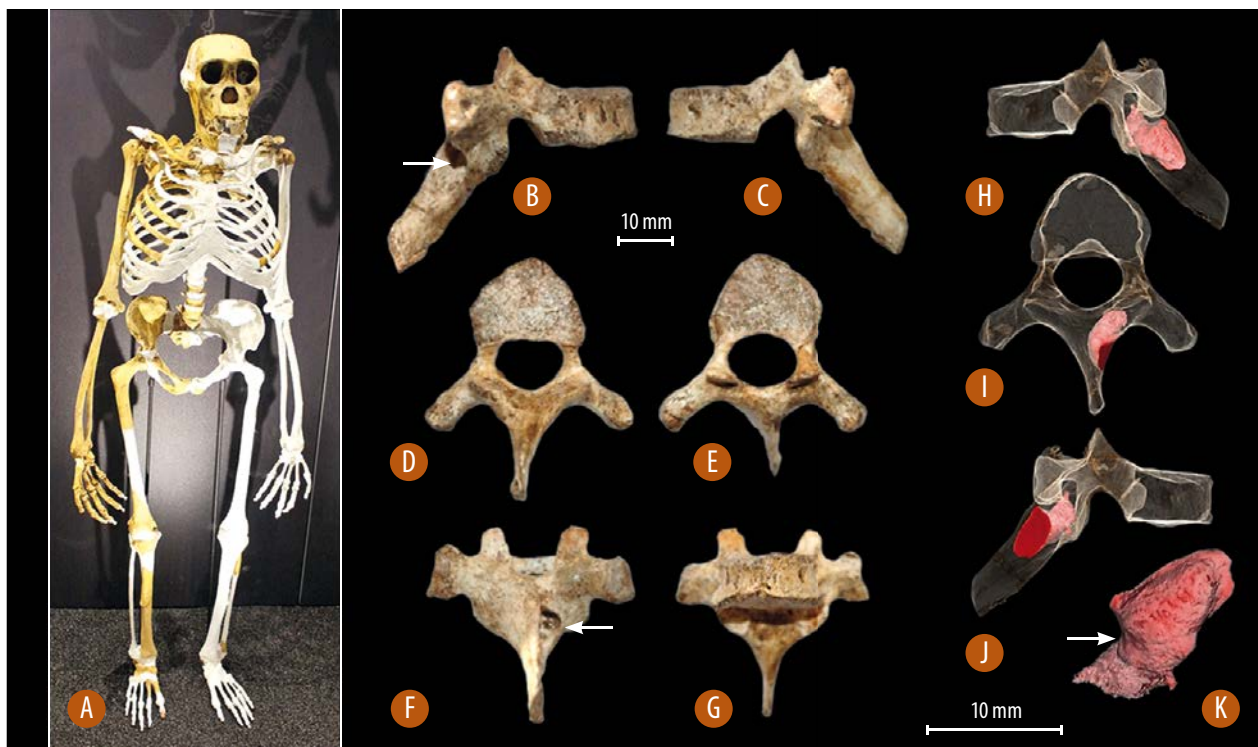
### Virtuele paleontologie nu en in de toekomst

Virtuele palaeontologie in het algemeen en het gebruik van synchrotron microtomografie voor de studie van fossielen in het bijzonder groeit sterk aan populariteit. Omdat de onderliggende technieken continue worden verbeterd komen steeds betere visualisatiemethoden voor een steeds grotere groep onderzoekers beschikbaar. Laboratorium- en medische CT-installaties worden ieder jaar krachtiger en een groeiende groep paleontologen weet de weg naar de synchrotrons te vinden. De nieuwe beamline BM18, het vlaggenschip van de Europese Synchrotron, maakt



AFBEELDING 6. | 3D model van het Halszkaraptor skelet op en in de transparant gemaakte steen (links; Paul Tafforeau, ESRF) en artistieke reconstructie van het dier (rechts; Lukas Panzarin & Andrea Cau).





AFBEELDING 7. | A. Een reconstructie van de MH1 Australopithecus sediba prepuberale jongen, foto door Emőke Dénes. B t/m G de borstwervel van verschillende aanzichten met in B en G een pijl naar het bottumor (schaalbalk van toepassing), H t/m J. Synchrotron reconstructies van de tumor in de borstwervel van verschillende aanzichten. K. Het bottumor, met een pijl ter indicatie van de overgang van de met breccia opgevulde holte en de tumorgroei in het bot. Afbeeldingen B t/m K zijn bewerkt van Randolph-Quinney et al., (2016).

optimaal gebruik van de recente upgrade van de synchrotronbron in Grenoble. Deze faciliteit maakt het mogelijk om ook grote fossielen in ongekend detail in beeld te brengen, waarbij het inzoomen op kleine details volledig is geautomatiseerd. De toenemende resolutie, flexibiliteit,

en efficiëntie maakt synchrotron tomografie bij uitstek geschikt voor de reconstructie van de geschiedenis van het leven, nu en in de toekomst.

### Dankwoord

We danken Bas van de Schootbrugge en de redactie van Grondboor & Hamer voor de uitnodiging om bij te dragen aan deze speciale uitgave, en Yannick Pommery en Ingmar Werneburg voor het beschikbaar maken van het beeldmateriaal van *Henodus*.

## LITERATUUR

- Cau, A., Beyrand, V., Voeten, D.F.A.E., Fernandez, V., Tafforeau, P., Stein, K., Barsbold, R., Tsogtbaatar, K., Currie, P.J. and Godefroit, P., 2017. *Synchrotron scanning reveals amphibious ecomorphology in a new clade of bird-like dinosaurs*. *Nature*, 552(7685), pp.395-399.
- Pommery, Y., Scheyer, T.M., Neenan, J.M., Reich, T., Fernandez, V., Voeten, D.F.A.E., Losko, A. and Werneburg, I. et al., 2021. *Dentition and feeding in Placodontia: Tooth replacement in Henodus chelyops*. *BMC Ecology and Evolution*.
- Randolph-Quinney, P.S., Williams, S.A., Steyn, M., Meyer, M.R., Smilg, J.S., Churchill, S.E., Odes, E.J., Augustine, T., Tafforeau, P. and Berger, L.R., 2016. *Osteogenic tumour in Australopithecus sediba: Earliest hominin evidence for neoplastic disease*. *South African Journal of Science*, 112(7-8), pp.1-7.
- Sanchez, S., Dupret, V., Tafforeau, P., Trinajstić, K.M., Ryll, B., Gouttenoire, P.J., Wretman, L., Zylberberg, L., Peyrin, F. and Ahlberg, P.E., 2013. *3D microstructural architecture of muscle attachments in extant and fossil vertebrates revealed by synchrotron microtomography*. *PLoS one*, 8(2), p.e56992.
- Voeten, D.F.A.E., Reich, T., Araujo, R. and Scheyer, T.M., 2018. *Synchrotron microtomography of a Nothosaurus marchicus skull informs on nothosaurian physiology and neurosensory adaptations in early Sauropterygia*. *PLoS one*, 13(1), p.e0188509.
- Voeten, D.F.A.E., Cubo, J., De Margerie, E., Röper, M., Beyrand, V., Bureš, S., Tafforeau, P. and Sanchez, S., 2018. *Wing bone geometry reveals active flight in Archaeopteryx*. *Nature communications*, 9(1), pp.1-9.

