

HET GEBRUIK VAN RADIOLOGISCHE BEELDVORMINGSTECHNIEKEN IN DE PALEOANTROPOLOGIE MET SPECIALE AANDACHT VOOR DE COMPUTER TOMOGRAFIE

Het gebruik van radiografie in de paleontologie is vrijwel even oud als de radiografie zelf. Door de superpositie van structuren enerzijds en de vaak hoge mineralisatiegraad van de fossielen anderzijds is de radiografie slechts ten dele in de paleontologie in het algemeen en de paleoantropologie in het bijzonder toegepast. Ook de conventionele tomografie heeft daar niets aan veranderd. Pas met de introductie van hoogoplossende computertomografie (CT) aan het begin van de jaren tachtig is het gelukt het in- en uitwendige van de fossielen naar tevredenheid af te beelden en daar ook metingen aan te verrichten. Dit onderzoek heeft geprofiteerd van de technologische verbeteringen van de CT-technologie, en vooral voor het dentale deel van het onderzoek wordt thans zelfs van speciale apparatuur gebruikgemaakt, zoals de micro-CT-scanner en het synchrotron, om tot extreem hoge resoluties van 5 tot 50 micron te komen. Voor grote of sterk gemineraliseerde fossielen kunnen speciale industriële CT-scanners worden gebruikt. Wat de nabewerkingstechnieken betreft is er ook veel voortgang geboekt. Voorbeelden zijn het maken van virtuele reconstructies door gebruik te maken van interne markeringspunten en het spiegelen van ontbrekende delen van het fossiel, het maken van modellen met behulp van stereolithografie, morfometrische analyses, het tenietdoen van geometrische vervormingen tijdens het fossilisatieproces en het gebruik van morphing-technieken om weke delen te reconstrueren.

Al heel vroeg heeft Branco de radiografie toegepast in de paleontologie om te testen of het mogelijk was kleine marine fossielen die ingebed zijn in zandsteen of visfossielen in leisteen zichtbaar te maken. Hij heeft ook een vel van een *Grypothierium*, behorende tot de Stegocefalen, afgebeeld (Branco, 1906). Dit is een amfibiesoort met een gepantserde huid waarin zich botstukjes bevinden. Even vroeg heeft Gorjanovic-Kramberger de radiografie toegepast in de paleoantropologie voor het bestuderen van zijn Neanderthalvondsten uit Krapina (Gorjanovic-Kramberger, 1906). Later zijn fraaie opnamen gemaakt van de Peking-mens (Black, 1928; Weidenreich, 1943). Problemen bij de radiografie waren niet alleen de hoge mineralisatie en de superpositie van de beelddetails, maar ook het feit dat vele fossiele schedels gevuld waren met een matrix van afzettings- of druipgesteente, de zogenaamde endocraniale matrix. In het geval van de Zuid-Afrikaanse *Australopithecus africanus*-schedel Sts 5 is deze tijdens het met explosieven



Figuur 1. Radiografie van de schedelbasis van Sts 5. Door de sterke mineralisatie is er geen detail zichtbaar in de voorste schedelgroeve en in de petrosa. Dankzij het ontbreken van de endocraniale matrix is wel detail zichtbaar in de gebieden van de temporaalkwabben en de achterste schedelgroeve. Opname van dr. J. Wind (Wind & Zonneveld, 1985)



Figuur 2. Conventioneel tomogram van het rotsbeen van La Quina H5. De halfcirkelvormige kanalen zijn vaag zichtbaar. Opname van dr. J. Wind (Wind & Zonneveld, 1985)

laten springen van het omgevende gesteente doormidden gebroken, zodat de endocraniale matrix verwijderd kon worden. We kunnen dus concluderen dat het alleen zin had schedels met een leeg endocranium te radiograferen (Figuur 1). Recentelijk is radiografie nog wel toegepast bij metatarsalen om aan te tonen dat de epifysen ontbreken (Sussman, 2008).

AUTEUR
PROF. DR. IR. FRANS W.
ZONNEVELD
(EMERITUS
HOOGLEERAAR
MEDISCHE
BEELDVORMENDE
TECHNIEKEN
UNIVERSITEIT VAN
UTRECHT)

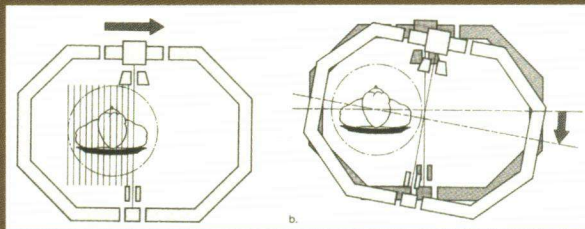
BASIPRINCIPE VAN CT

De eerste CT-scanner, de EMI Mark I, is in 1972 geïntroduceerd. Deze scanner kon twee naast elkaar liggende plakken tegelijk afbeelden en bezat daartoe per plak één detector. Buis en detector voerden een translatie uit waarna de scanner over één graad roteerde om vervolgens weer een translatie te doen. Dit werd voortgezet over een rotatie van minimaal 180 graden en dat duurde dan 5 minuten. Deze scanner was alleen geschikt om het hoofd van een patiënt te scannen en is bij mijn weten dan ook nooit gebruikt voor paleontologisch onderzoek. De resolutie was 3 mm en de dunste plakdikte was 8 mm. Deze geometrie (Figuur 3) werd aangeduid met de 'eerste generatie'.

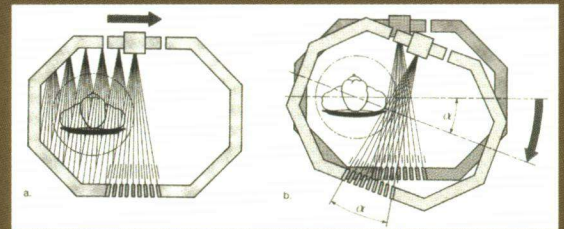
In 1975 bracht EMI een body-scanner uit, de CT 5005. Deze bezat een waaier van 30 detectoren die samen met de buis transleerde. Het gevolg was 30 simultane projectieprofielen maar nu echter met slechts één plak tegelijk. Na de translatie kon nu met stappen van 10 graden worden gerooteerd waardoor de scantijd werd verkort tot 20 seconden, een tijd waarin de patiënt z'n adem kon inhouden waardoor ook de longen konden worden gescand. In deze geometrie (Figuur 4) sprak men van de 'tweede generatie'. De resolutie was ongeveer 2 mm en de plakdikte was 13 mm. Deze scanner is gebruikt voor paleontologisch onderzoek (Jungers & Minns, 1979).

In 1976 introduceerde GE de eerste bruikbare CT-scanner, de CT/T 7800, die zoveel detectoren (320) had dat hij alleen maar rond hoefde te draaien waardoor de scantijd werd gereduceerd tot 4,8 sec. Deze geometrie (Figuur 5) werd 'derde generatie' genoemd en de plakdikte kon worden gereduceerd tot 5 mm terwijl de resolutie ruim een millimeter bedroeg. Deze scanner is gebruikt voor paleoanthropologisch onderzoek (Tate & Cann, 1982). In 1978 kwam Philips met eenzelfde type scanner waarbij de afstand tussen röntgenbuis en rotatie-as variabel was zodat hogere resoluties konden worden bereikt. Dit heet 'geometrische vergroting'.

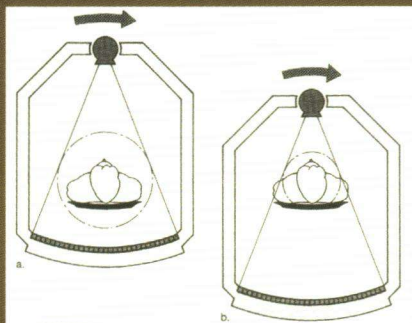
Omdat de derde generatie CT-scanner gevoelig was voor ringvormige beeldfouten (artefacten) werd er later nog een vierde generatie geïntroduceerd (Figuur 6) waarbij een stationaire ring van detectoren werd toegepast waarbinnen de röntgenbuis roteerde. Omdat de problemen in de derde generatie scanner konden worden opgelost is dit uiteindelijk het standaardtype scanner geworden dat thans is geëvolueerd naar een hoge-resolutie multi-slice scanner met spiraalscan technologie zodat de rotatie niet steeds hoeft te worden gestopt maar dat het gehele gebied in één keer gescand kan worden. De beeldreconstructie in CT is gebaseerd op een zogenaamde gefilterde terugprojectie. Dat betekent dat de gescande profielen (projecties) gefilterd worden zodanig dat naarmate de details kleiner zijn deze meer versterkt worden omdat tijdens het terugprojecteren van de profielen over het beeld het omgekeerde gebeurt (kleine details worden extra verzwakt). Een beeld is opgebouwd uit een matrix van beeldelementen die in 2D 'pixels' en in 3D 'voxels' worden genoemd.



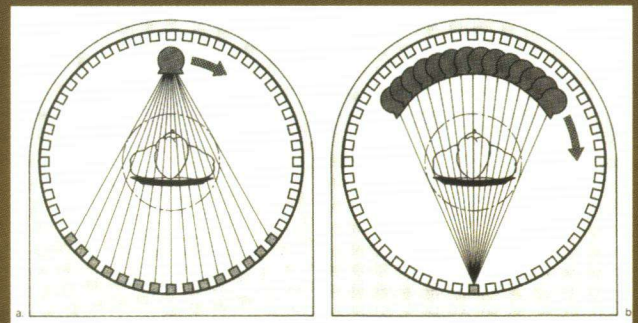
Figuur 3: Eerste generatie scangeometrie met één detector per plak en opgebouwd uit translaties (3a) gevolgd door kleine rotatie incrementen (3b)



Figuur 4: Tweede generatie scangeometrie met een smalle waaier van detectoren en opgebouwd uit translaties (4a) gevolgd door rotaties in grote stappen van meestal 10 graden (4b)



Figuur 5: Derde generatie scangeometrie met een brede waaier van veel detectoren die het gehele te scannen object omvat waardoor alleen gerooteerd hoeft te worden. In een speciale uitvoering is het juk met buis en detectoren verschuifbaar zodat een klein object met hoge resolutie (5a) of een groot object met lagere resolutie (5b) gescand kan worden



Figuur 6: Vierde generatie scangeometrie met een ring van stationaire detectoren waarbinnen de buis draait (6a) en waarbij een projectie wordt opgebouwd uit metingen van één detector in combinatie met een reeks van buisposities (6b)

PROBLEMEN MET CT

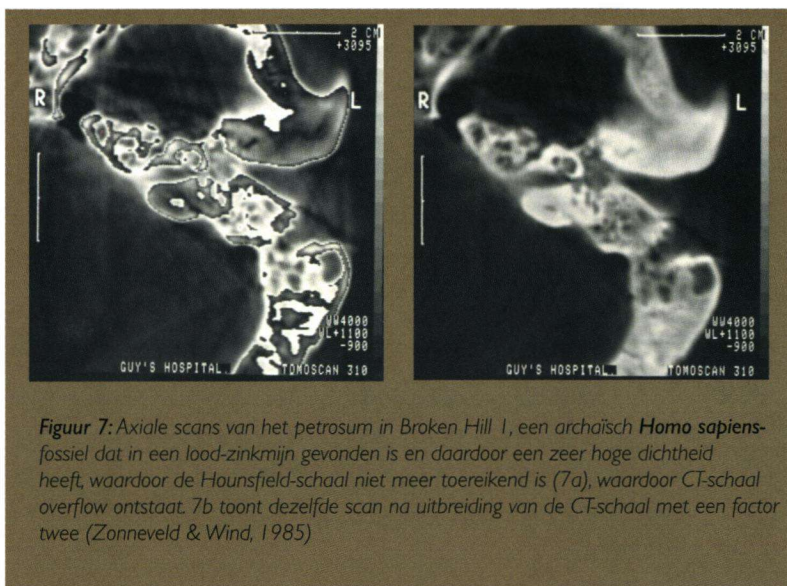
We beschrijven hier een paar problemen die met CT van fossielen kunnen optreden.

CT-schaal overflow betekent dat de locale densiteit van het object zo hoog is dat de standaard CT-schaal, die ontworpen is om dichtheden van lucht tot tandglazuur weer te geven onvoldoende is.

Beam-hardening artefacten zijn beeldfouten die ontstaan doordat een röntgenbuis straling produceert met verschillende energieën die door het gescande object in verschillende mate worden verzwakt. Normaal is een CT-scanner gecalibreerd voor patiëntenonderzoek. Als fossielen worden gescand is de mineralisatie vaak zo hoog dat de calibratie niet meer klopt en de beeldfouten ontstaan in de vorm van strepen.

'Frozen noise' artefacten zijn beeldfouten die ontstaan doordat er te weinig straling door het te onderzoeken object heen komt, waardoor de ruis in de metingen zo hoog wordt dat deze als het ware in de vorm van ruisstrepen in de beeldreconstructie terecht komt.

Partieel volume effect is een verschijnsel dat optreedt doordat er met te dikke plakken of te lage resolutie wordt gescand. Hierdoor worden de primaire metingen uitgemiddeld, echter omdat de beeldreconstructie een niet-lineair proces is leidt dit tot beeldfouten.



Figuur 7: Axiale scans van het petrosium in Broken Hill 1, een archaisch *Homo sapiens*-fossiel dat in een lood-zinkmijn gevonden is en daardoor een zeer hoge dichtheid heeft, waardoor de Hounsfield-schaal niet meer toereikend is (7a), waardoor CT-schaal overflow ontstaat. 7b toont dezelfde scan na uitbreiding van de CT-schaal met een factor twee (Zonneveld & Wind, 1985)

femur en tibia van *Megaladapis edwardsi* uit Madagaskar, een uitgestorven reuzenlemuurachtige, een primitieve primatensoort die voorouder van aap, mensaap en mens kan zijn geweest. De auteurs konden op basis van deze scans conclusies trekken over de weerstand tegen buigmomenten en concludeerden dat deze lemuurachtige sterkere botten had dan de huidige mens (Jungers & Minns, 1979). In 1978 heeft Wind een poging gedaan de Neanderthal-kinderschedel van Mojokerto te scannen, maar de endocraniale matrix leverde een slecht resultaat op (Wind & Zonneveld, 1985). Zijn poging met een Elscint Exel 705-scanner in 1980 het rotsbeen te scannen van de *Homo erectus*-schedelbasis Sangiran 4, leverde betere resultaten op, hoewel de plakdikte nog altijd 5 mm was (Wind, 1984). Tate en Cann hebben in 1980 nog een studie gedaan aan een tibia uit Ethiopië (Omo 1), maar hadden veel last van beam-hardening artefacten en overflow van de CT-schaal (Tate & Cann, 1982) Ook zij gebruikten 5 mm plakken op een GE CT/T 7800.

HOGERESOLUTIE COMPUTER-TOMOGRAFIE

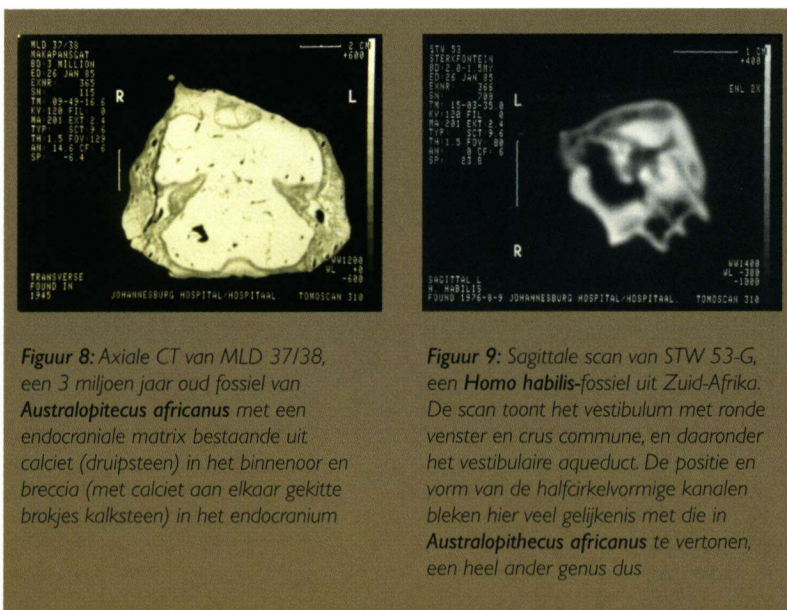
Begin jaren tachtig werden CT-scanners geïntroduceerd met een resolutie van ongeveer 1 mm en plakdikten tussen 1,5 en 2 mm. De eersten die hiermee in januari 1983 aan de slag gingen waren Conroy en Vannier. Zij scanden een schedel van een *Stenopsochoerus* (fossiel zoogdier van 30 miljoen jaar oud) met plakken van 2 mm en een resolutie van 1,1 mm op een Siemens Somatom 2 en berekenden op basis van de scans ook een primitief soort 3D-beeld, volgens een methode waarbij de grijswaarde in het beeld bepaald werd door de kijkafstand volgens het principe: hoe dichter bij hoe witter (Conroy & Vannier, 1984). Door dr. Wind werd ik gevraagd onderzoek naar het fossiele rotsbeen te doen, en in juni 1983 is een proef gedaan met een fossiele viswervel en in juni 1983 met een Indonesische schedel, de Wajak 1 (Zonneveld & Wind, 1985). De Philips

CONVENTIONELE TOMOGRAFIE

In de jaren zestig heeft Legoux conventionele tomografie aangewend om de dentaire leeftijd te bepalen in de Neanderthal-kinderschedel van La Quina H18 (Legoux, 1966). Later heeft men ook bij een aantal fossielen geprobeerd tomogrammen van het rotsbeen te maken (Figuur 2). Door de superpositie van gemineraliseerde delen buiten het afgebeelde vlak gaf dit slechts matige resultaten.

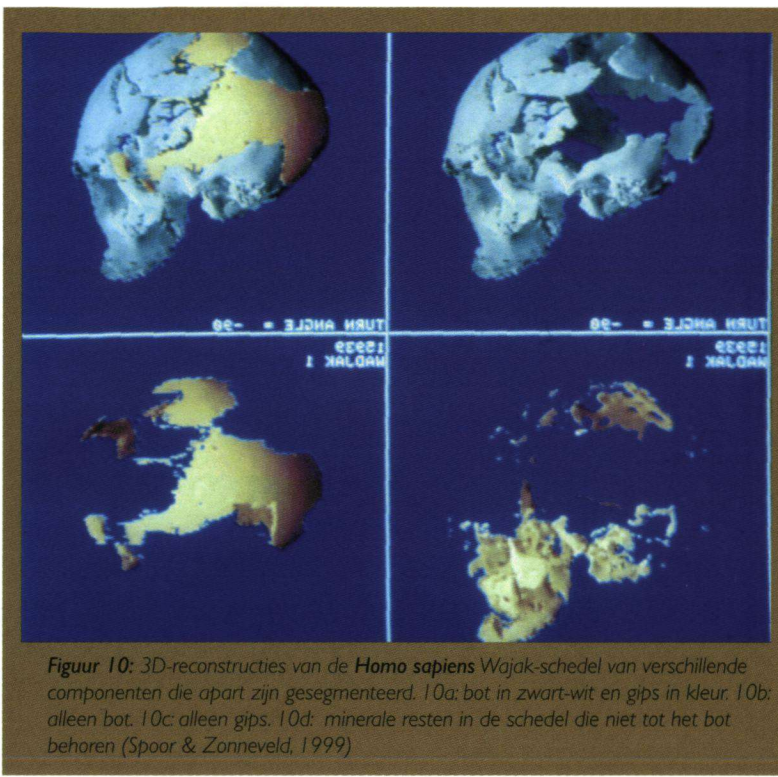
VROEGE COMPUTER-TOMOGRAFIE

In de begintijd van CT (1972-1982) waren de plakdikte en de resolutie van CT nog onvoldoende om bevredigende afbeeldingen te maken. Toch hebben een aantal onderzoekers hiertoe pogingen ondernomen. In 1977 hebben Jungers en Minns met de EMI 5005 CT-scans gemaakt van de



Figuur 8: Axiale CT van MLD 37/38, een 3 miljoen jaar oud fossiel van *Australopithecus africanus* met een endocraniale matrix bestaande uit calciet (druipsteen) in het binnenoer en breccia (met calciet aan elkaar gekitte brokjes kalksteen) in het endocranium

Figuur 9: Sagittale scan van STW 53-G, een *Homo habilis*-fossiel uit Zuid-Afrika. De scan toont het vestibulum met ronde venster en crus commune, en daaronder het vestibulaire aqueduct. De positie en vorm van de halfcirkelvormige kanalen bleken hier veel gelijkenis met die in *Australopithecus africanus* te vertonen, een heel ander genus dus



Figuur 10: 3D-reconstructies van de *Homo sapiens* Wajak-schedel van verschillende componenten die apart zijn gesegmenteerd. 10a: bot in zwart-wit en gips in kleur. 10b: alleen bot. 10c: alleen gips. 10d: minerale resten in de schedel die niet tot het bot behoren (Spoor & Zonneveld, 1999)

Tomoscan 310 leverde beelden van goede kwaliteit, gebruikmakend van een plakdikte van 1,5 mm; alleen trad er soms overflow van de CT-schaal op. Toen in maart 1984 in Londen de Broken Hill 1-schedel werd gescand, bleek de overflow van de CT-schaal buiten proportie, omdat dit fossiel doortrokken was met lood en zink. Daartoe was een speciale actie nodig om de CT-schaal een factor twee uit te breiden (Figuur 7) (Zonneveld *et al.*, 1989). Om deze speciale actie te vermijden hebben we later veel gebruikgemaakt van stralopharding-calibratietechnieken op basis van aluminium in plaats van plexiglas, waardoor de CT-schaal zo'n 40% breder werd. Door de geometrische vergroting bleek de signaalsterkte zo verbeterd te zijn dat ook schedels met een endocraniale matrix gescand konden worden (Figuur 8). De goede beeldkwaliteit was voor ons aanleiding een onderzoek te starten naar de vorm van het labirint. C.F. Spoor zou daar in 1993 op promoveren (Spoor, 1993). Interessante conclusies konden worden getrokken ten aanzien van *Australopithecus*, die een labirint bleek te hebben dat veel leek op dat van de mensapen (Spoor *et al.*, 1994). Conclusie was dat ze naast het op twee benen lopen ook nog veel tijd in de bomen doorbrachten. Deze analyse-methode maakte het ook mogelijk Neanderthalers van *Homo sapiens* te onderscheiden (Hublin *et al.*, 1996), en om te concluderen dat *Homo habilis* meer leek op een *Australopithecus* dan op de *Homo erectus* (Figuur 9).

Op dezelfde wijze hebben ook andere onderzoekers bepaalde onderzoekgebieden gekozen, zoals bijv. de dentale ontwikkeling bij *Australopithecus africanus* (Conroy & Vannier,

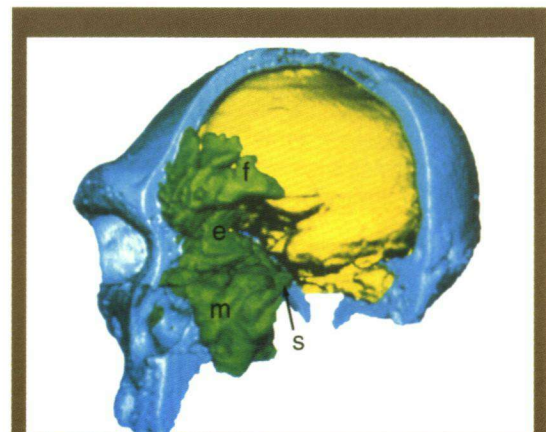
1987), de dikte van het tandglazuur (Macho & Thackeray, 1992), de kyfose van de schedelbasis (Ross *et al.*, 2004) of de sterkte van lange beenderen (Ruff, 2008).

DRIEDIMENSIONALE BEELDVORMING

Ook de techniek van 3D-reconstructie, die sinds het einde van de jaren zeventig ingang had gevonden, werd in de paleoantropologie toegepast. Mooie voorbeelden zijn het weglaten van reconstructiehelpmiddelen zoals gips (Spoor & Zonneveld, 1999) (Figuur 10) en het bepalen van volumina (Spoor & Zonneveld, 1999) (Figuur 11) door deze structuren te segmenteren; maar ook konden zo anatomische varianten zoals een occipitale marginale sinus afgebeeld worden (Spoor & Zonneveld, 1999). Andere onderzoekers hebben gekeken naar de hersenvorm als afspiegeling van de endocraniale vorm en het patroon van de meningeale vaten (Bruner, 2003; Bruner & Manzi, 2003), schedelbasismorfologie en slaapbeenpneumatisatie (Balzeau & Grimaud-Hervé, 2006) en visualisatie van interne structuren door middel van 'cut-away views' en transparante reconstructies (Semal *et al.*, 2005).

MODERNE NABEWERKINGS-TECHNIEKEN EN MODELLEN

Door middel van nabewerkingstechnieken kunnen de CT-data nieuwe resultaten opleveren. Zo kan met een vorm van functionele beeldvorming de dikte van een bot gecodeerd in een kleur of een helderheid op de 3D-reconstructie van dat bot worden weergegeven (Weber, 2001). Een voor fossielen heel interessante nabewerkingstechniek is het bepalen van het vlak van symmetrie aan de hand van een aantal markeringspunten en vervolgens spiegelen van het fossiel, om zodoende een meer complete reconstructie te verkrijgen (Zollikofer *et al.*, 1995; Ponce de Léon & Zollikofer, 1999). Daarna kan men het gevonden oppervlak van het fossiel gebruiken om er markeringspunten aan te ontlenden die voor morfometrische analyses kunnen dienen (Weber, 2001). Daarnaast is het mogelijk de gevonden virtuele reconstructie om te zetten in een fysiek model met behulp van stereolithografie (Zollikofer *et al.*, 1998). Dit model kan dan later nog worden beschilderd (Zollikofer *et al.*, 1995). Intussen zijn technieken ontwikkeld om de vorm van fossielen van verschillende menssoorten in elkaar over te laten gaan. Deze techniek heet 'morphing'. Hiermee kunnen bijv. tussenstadia van ontogenetische groei worden berekend. Maar men kan zo bijv. ook de weke delen van de moderne mens meevervormen totdat deze past op de botvorm van de Neanderthaler, en zo is een benadering mogelijk van de weke delen van een Neanderthaler (Zollikofer & Ponce de Léon, 2006) en daarmee ook een gezichtsreconstructie. Bij zeer oude fossielen komt het voor dat deze door de druk van het omliggende gesteente in de loop der tijd zijn verbrijzeld; de stukjes hebben hun onderlinge relatie



Figuur 11: De Broken Hill-schedel in een 'cut-away view' met in groen de neusbijholten (m= sinus maxillaris, e= sinus ethmoidalis, s= sinus sphenoidalis, f=sinus frontalis) en in geel de herseninhoud. Op basis van aparte segmentaties konden de volumina van deze structuren bepaald worden (Spoor & Zonneveld, 1999)

dan weliswaar behouden, maar die relatie is wel vervormd. Er zijn nu mogelijkheden om die stukjes in de reconstructie tegen elkaar aan te passen en zo de vervorming teniet te doen (Zollikofer *et al.*, 2005). Het nieuwste is simulatiesoftware waarmee bijv. een geboorte bij Neanderthalers gesimuleerd kan worden (Ponce de Léon *et al.*, 2008).

NIEUWE TOMOGRAFISCHE AFBEELDINGSTECHNIEKEN

In navolging van de pioniersarbeid op het gebied van micro-CT aan de ETH in Zürich zijn uiteindelijk meerdere typen micro-CT-scanners ontwikkeld, waaronder enkele die commercieel verkrijgbaar zijn, zoals de SkyScan 1172. Deze apparaten blijken zeer geschikt te zijn om met hoge resolutie losse tanden en kiezen te scannen. Veel aandacht gaat daarbij uit naar de verdeling van de tandglazuurdikte en de vorm van de cusps, die bijzonder goed zichtbaar wordt in 3D-reconstructies van het scheidingsvlak tussen tandglazuur en dentine (Skinner *et al.*, 2008). Als gebruik wordt gemaakt van de monochromatische synchrotronröntgenstraling, wordt de beeldkwaliteit nog beter vanwege het ontbreken van stralenopharding (Olejniczak *et al.*, 2007; Smith *et al.*, 2009). Er bestaan ook industriële CT-scanners, bijv. van Xview CT of BIR, met röntgenbuisen die tot 450 kV aankunnen en die gebruikt worden voor materiaalonderzoek en zogenaamd 'reverse engineering'. Ook dit type scanner wordt een enkele keer ingezet om grotere fossielen of fossielen met extra hoge dichtheid te scannen.

Gedurende de afgelopen 25 jaar hebben de ontwikkelingen in de computertomografie een zo grote bijdrage geleverd dat deze beeldvormingstechniek niet meer weg te denken is uit de paleoantropologie. Er zijn inmiddels meer dan 380 verschillende hominiene fossielen gescand, waarvan 50% voor schedelonderzoek en 43% voor dentaal onderzoek. Er zijn ruim 160 publicaties over verschenen.

LITERATUUR

Balzeau, A. & D. Grimaud-Hervé, 2006: Cranial base morphology and temporal bone pneumatization in Asian Homo erectus, *Journal of Human Evolution* 51, 350-359.

Black, D., 1929: Preliminary note on additional Sinanthropus material discovered in Chou Kou Tien during 1928, *Bulletin of the Geological Society of China* VIII(1), 15-32.

Branco, W., 1906: Die Anwendung der Röntgenstrahlen in der Paläontologie, Berlin: Verlag der Preussischen Akademie der Wissenschaften.

Bruner, E., 2003: Fossil traces of the human thought: paleoneurology and the evolution of the genus Homo, *Rivista di Anthropologia* 81, 29-56.

Bruner, E. & G. Manzi, 2003: Encephalization and allometric trajectories in the genus Homo: evidence from the Neandertal and modern lineages, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100, 15335-15340.

Conroy, G.C. & M.W. Vannier, 1984: Noninvasive three-dimensional computer imaging of matrix-filled fossil skulls by high-resolution computed tomography, *Science* 226, 456-458.

Conroy, G.C. & M.W. Vannier, 1987: Dental development of the Taung skull from computerized tomography, *Nature* 329, 625-627.

Gorjanovic-Kramberger, K., 1906: Der diluviale Mensch von Krapina in Kroatien, Wiesbaden: Kriedel's Verlag.

Hublin, J.-J., F. Spoor, M. Braun, F. Zonneveld & S. Condemi, 1996: A late Neanderthal associated with Upper Palaeolithic artefacts, *Nature* 381, 224-226.

Jungers, W.L. & R.J. Minns, 1979: Computed tomography and biomechanical analysis of fossil long bones, *American Journal of Physical Anthropology* 50, 285-290.

Legoux, P., 1966: Détermination de l'âge dentaire de fossiles de la lignée humaine, Paris: Librairie Maloine S.A.

Macho, G.A. & J.F. Thackeray, 1992: Computed tomography and enamel thickness of maxillary molars of Plio-Pleistocene hominids from Sterkfontein, Swartkrans and Kromdraai (South Africa): an exploratory study, *American Journal of Physical Anthropology* 89, 133-143.

Olejniczak, A.J., P. Tafforeau, T.M. Smith, H. Temming & J.J. Hublin, 2007: Technical note: Compatibility of microtomographic imaging systems for dental measurements, *American Journal of Physical Anthropology* 134, 130-134.

Ponce de León, M.S. & C.P.E. Zollikofer, 1999: New evidence from le Moustier 1: Computer-assisted reconstruction and morphometry of the skull, *Anatomical Record* 254, 474-489.

Ponce de León, M., L. Golovanova, V. Doronichev, G. Romanova, T. Akazawa, O. Kondo, et al., 2008: Neanderthal birth and the evolution of human life history, *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105, 13764-13768.

Ross, C., M. Henneberg, M.J. Ravosa & S. Richard, 2004: Curvilinear, geometric and phylogenetic modelling of basicranial flexion: is it adaptive, is it constrained? *Journal of Human Evolution* 46, 185-213.

Ruff, C., 2008: Femoral/humeral strength in early African Homo erectus, *Journal of Human Evolution* 54, 383-390.

Semal, P., M. Toussaint, B. Maureille, H. Rougier, I. Crevecoeur, A. Balzeau, et al., 2005: Numérisation du restes humains néandertaliens belges. Préservation patrimoniale et exploitation scientifique, *Notae Prehistoricae* 25, 25-38.

Skinner, M.M., B.A. Wood, C. Boesch, A.J. Olejniczak, A. Rosas, T.M. Smith & J.J. Hublin, 2008: Dental trait expression at the enamel-dentine junction of lower molars in extant and fossil hominoids, *Journal of Hu-*

man Evolution 54, 173-186.

Smith, T.M., A.J. Olejniczak, K. Kupczik, V. Lazzari, J. de Vos, O. Kullmer, et al., 2009: Taxonomic assessment of the Trinil molars using non-destructive 3D structural and development analysis, *PaleoAnthropology*, 117-129.

Spoor, C.F., 1993: The comparative morphology and phylogeny of the human bony labyrinth (a CT study). Proefschrift Universiteit van Utrecht (7 december 1993).

Spoor, F., B. Wood & F. Zonneveld, 1994: Implications of early hominid labyrinthine morphology for evolution of human bipedal locomotion, *Nature* 369, 645-648.

Spoor, F. & F. Zonneveld, 1999: Computed tomography-based three-dimensional imaging of hominid fossils: features of the Broken Hill 1, Wadjak 1, and SK 47 crania, In: T. Koppe, H. Nagai & K. Alt (eds.): *The paranasal sinuses of higher primates. Development, function, and evolution*, Chicago: Quintessence Publishing, 207-226.

Sussman, R.L., 2008: Brief communication: Evidence bearing on the status of Homo habilis at Olduvai Gorge, *American Journal of Physical Anthropology* 137, 356-361.

Tate, J.R. & C.E. Cann, 1982: High-resolution computed tomography for the comparative study of fossil and extant bone, *American Journal of Physical Anthropology* 58, 67-73.

Weber, G.H., 2001: Virtual anthropology (VA): A call for Glasnost in paleoanthropology, *Anatomical Record* 265, 193-201.

Weidenreich, F., 1943: The skull of Sinanthropus pekinensis, a comparative study on a primitive hominid skull, *Pal Sin new series D* 10, 1-291.

Wind, J. 1984: Computerized x-ray tomography of fossil hominid skulls, *American Journal of Physical Anthropology* 63, 265-282.

Wind, J. & F.W. Zonneveld, 1985: Radiology of fossil hominid skulls, In: P.V. Tobias (ed.): *The past, present and future of hominid evolutionary studies*, New York: Alan Liss, 437-442.

Zollikofer, C.P.E., M.S. Ponce de León, R.D. Martin & P. Stucki, 1995: Neanderthal computer skulls, *Nature* 375, 283-285.

Zollikofer, C.P.E., M.S. Ponce de León & R.D. Martin, 1998: Computer-assisted paleoanthropology, *Evolutionary Anthropology* 6(2), 41-54.

Zollikofer, C.P.E., M.S. Ponce de León, D.E. Lieberman, F. Guy, D. Pilbeam, A. Likius, et al., 2005: Virtual cranial reconstruction of Sahelanthropus tchadensis, *Nature* 434, 755-759.

Zollikofer, C.P.E. & M.S. Ponce de León, 2006: Digital Neanderthals: a view on the first decade of research, In: R.W. Schmitz (ed.): *Neanderthal 1856-2006*, Mainz: Philipp von Zabern, 257-276.

Zonneveld, F.W. & J. Wind, 1985: High-resolution computed tomography of fossil hominid skulls: a new method and some results, In: P.V. Tobias (ed.): *The past, present and future of hominid evolutionary studies*, New York: Alan Liss, 427-436.

Zonneveld, F.W., C.F. Spoor & J. Wind, 1989: The use of CT in the study of the internal morphology of hominid fossils, *Medicamundi* 34, 117-128.