

Röntgenopnamen van leisteenfossielen uit Bundenbach

door Wouter H. Südkamp

De leisteenfossielen uit het plaatsje Bundenbach (Zuidwest-Duitsland) zijn absoluut gedateerd circa 370 miljoen jaar oud. Gidsfossielen (brachiopoden, tentaculieten en trilobieten) wijzen op een Vroeg-Devonische ouderdom. Bundenbach is als "Fossil-Lagerstätte" wereldberoemd. Deze vindplaats wordt immers door het voorkomen van volledig intacte fossielen gekenmerkt, die soms zelfs nog de weke delen tonen. Bundenbach is met het Noord-Amerikaanse Beecher's Trilobite Bed (Ordovicium) en het Franse La Voulte-sur-Rhône (Jura) de enige Lagerstätte, waar de fossielen in pyriet (ijzersulfide) zijn omgevormd. Deze samenstelling maakt het mogelijk, de fossielen mechanisch uit te prepareren, waarbij gebruik kan worden gemaakt van tevoren gemaakte röntgenfoto's.

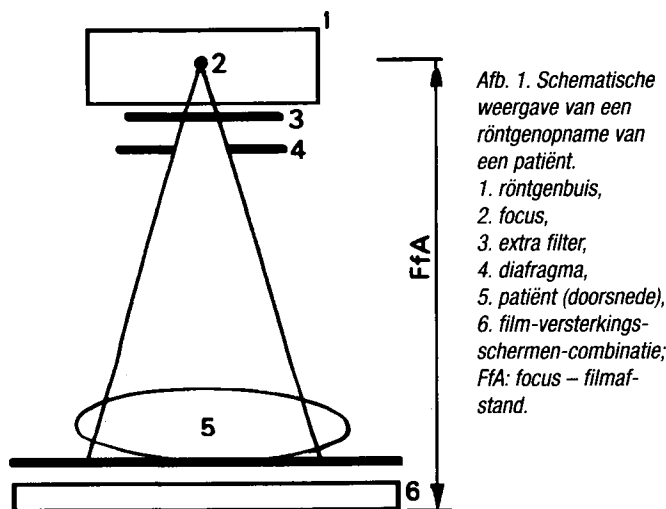
In het *Gea*-nummer over Bundenbach (maart 1989, volume 22) is reeds uitvoerig ingegaan op de vindplaats en de fossielen. In dit artikel staan de röntgenopnamen centraal, die in bijna elke studie van Bundenbachfossielen als hulpmiddel fungeren om nieuwe soorten te beschrijven. De röntgentechniek maakt het immers mogelijk om dwars door de leisteenplaat heen te kijken. Bij ongeprepareerde fossielen kan het fossiel worden ontdekt, c.q. de ligging in de leisteenplaat worden vastgesteld, zonder schade aan het object te veroorzaken. Bij geprepareerde fossielen is het mogelijk de (inwendige) delen van het fossiel, die niet kunnen worden blootgelegd, zichtbaar te maken. Soms wordt de röntgentechniek ingezet om vervalsingen aan te tonen. Dit artikel is een coproductie met de fotograaf Piet Stemvers, die zich inzette om alles uit mijn best gelukte röntgennegatieven te halen, wat erin zit.

De röntgentechniek

Iedereen kent wel de voornaamste toepassing van röntgenstralen, namelijk het voor medische doeleinden maken van een opname van de borstkas, het gebroken been of de arm tijdens de wintersportvakantie of de gebitopname bij de tandarts. De werking, een fotografisch contrast of zwarting op het negatief, berust op de verschillende dichtheid van het doorgelichte materiaal. In het geval van de leisteenfossielen dringt de straling immers minder door het relatief dichte pyriet en meer door de gemakkelijk doordringbare leisteen heen. De röntgentechniek kent vele toepassingen in de natuurkunde, de chemie en de techniek. Voorbeelden hiervan zijn het ophelderen van moleculaire structuren, de controle van gietstukken en lasnaden, het archeologische onderzoek aan mummies en veenlijken en de veiligheidscontrole van de bagage op het vliegveld. Een spectaculair voorbeeld uit de ruimtevaart is het apparaat dat een wetenschapper van de universiteit Mainz ontwikkelde en dat, gemonteerd op de Marssonde *Opportunity*, met behulp van röntgenstralen onlangs op Mars een gesteenteanalyse uitvoerde met als resultaat jarosiet. Dit ertsmineraal kan slechts in waterige sedimenten ontstaan, zodat hiermee het bewijs is geleverd dat er op Mars ooit water aanwezig is geweest.

De werking van röntgenstralen, in de Angelsaksische landen ook wel X-stralen genoemd, werd in november 1895 bij toeval door Wilhelm Conrad Röntgen ontdekt. Hij experimenteerde met kathodestrallen in bijna luchtdelige glazen buizen. In zo'n buis wekte hij met behulp van een elektrische machine stroom van hoge spanning op. Stralen van de negatief geladen kathode botsten tegen de positieve anode, waardoor elektromagnetische golven, met een 10.000 maal kleinere golflengte en 10.000 maal grotere energie dan het licht, werden opgewekt. Het toevallige

van de ontdekking was, dat een nabije fluorescerende plaat, die voor het aantonen van ultraviolette straling dient, in het donker zwak oplichtte. Röntgen had meteen in de gaten, dat hiervoor onzichtbare en onbekende stralen, zogenoemde X-stralen, verantwoordelijk waren. Proefondervindelijk kwam hij verder tot de ontdekking, dat deze stralen door allerlei stoffen heen gingen, maar niet door lood van 1,5 mm dikte. Ook zag hij dat de botjes van zijn vingers, waarmee hij het stukje lood vasthield, de stralen absorbeerden en zich een schaduw op het scherm aftekende. Röntgen publiceerde zijn bevindingen rap in zijn "Vorläufige Mitteilung über eine neue Art von Strahlen". Op 5 januari 1896 maakt het Weense dagblad "Die Presse" de sensationele ontdekking wereldkundig. De natuurkunde maakte een revolutie door. Al in hetzelfde jaar volgde de ontdekking van de radioactiviteit (H. Becquerel), een jaar later gevolgd door die van het elektron (J.J. Thomson). Het was dan ook onontkoombaar, dat Röntgen in 1901 de eerste Nobelprijs voor natuurkunde ontving. Het opwekken van röntgenstraling vindt tegenwoordig plaats in een hoog-vacuüm gepompte buis. *Afb. 1*. De kathode wordt met een gloeispiraal verhit. De anode is gemaakt van een zwaar metaal, zoals wolfram, hetgeen als voordeel een hoog smeltpunt heeft. Immers een vrij klein deel van de bewegingsenergie komt beschikbaar als straling, de rest is warmte. Daarom moet de anode robuust worden uitgevoerd en is koeling noodzakelijk.



Afb. 1. Schematische weergave van een röntgenopname van een patiënt.
1. röntgenbuis,
2. focus,
3. extra filter,
4. diafragma,
5. patiënt (doorsnede),
6. film-versterkingschermen-combinatie;
FfA: focus – filmafstand.

Omdat ioniserende straling kanker kan veroorzaken, moet de röntgenruimte aan speciale vereisten voldoen (denk aan afscherming) en moet het personeel over een goede opleiding beschikken. Het gevaar is echter te verwaarlozen, omdat bij de röntgendiagnostiek, radiotherapie en nucleaire geneeskunde telkens ongeveer een tiende van de stralingsdoses wordt gebruikt waaraan iedereen sowieso jaarlijks blootstaat (het achtergrondniveau). Bovendien overweegt het medisch nut voor de patiënt.

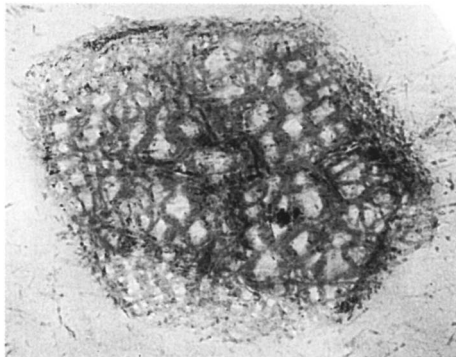
De toepassing in de paleontologie

Reeds in november 1896 werden door Brühl in Berlijn en Lemoine in Parijs de eerste röntgenopnamen van gesteenten en fossielen gemaakt. In de daarop volgende decennia zijn in de literatuur

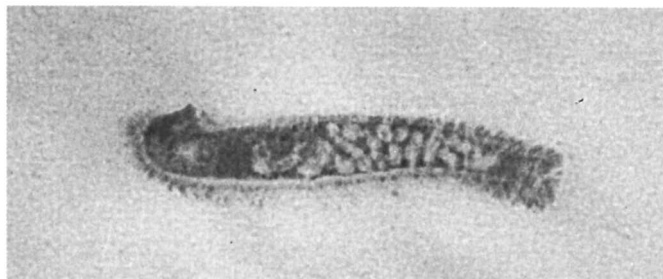
steeds weer op zich staande artikelen te vinden, waarbij de röntgenopnamen, meestal door radiologen en volgens medische maatstaven, werden vervaardigd. Pas sinds de jaren '30 zette de stralingsdeskundige W.M. Lehmann in Bonn en Hamburg de röntgentechniek in met als voornaamste doel het onderzoek aan fossielen uit de Hunsrückleiste. Hij maakte 3000 foto's. Een indrukwekkend voorbeeld van zijn werk is de monografie van de zee- en slangsterren uit Bundenbach, die pas na de Tweede Wereldoorlog, in 1957, kon verschijnen.

In de periode 1957-1987 lukte het de interdisciplinaire exacte wetenschapper W.H. Stürmer om, via de optimalisatie van de opnametechniek en werkwijze, details van minder dan 5 micrometer (!) zichtbaar te maken. Zijn "oeuvre" omvatte eind 1979 bijna 22.000 röntgenfoto's, waarvan de meeste objecten Bundenbach betreffen. Deze objecten waren vooral afkomstig van de arbeiders uit de beroemde leisteengroeve Eschenbach-Bocksberg, uit privé-collecties en voorts uit musea. De desbetreffende leisteentafels werden gemerkt met de voor Wilhelm Stürmer typische etikettes "WS + nummer" en "Rö Archiv + nummer".

Maar ook fossielen uit oudere en jongere Lagerstätten werden opgenomen. Het betreft bijvoorbeeld de trilobiet *Triarthrus* uit voornoemd Beecher's Trilobite Bed, een Tertiaire kleine vleermuis - met aangetoond ecosysteem in de oren - uit de groeve Messel bij Darmstadt en de kop van de zogenoemde giraffehals-sauriër *Tanystropheus* van Monte San Giorgio (Trias, Zwitserland). Stürmer werd ook bekend door zijn opgraving in de Kaisergroeve nabij Gemünden. Een mobiel röntgenlab, vanaf 1971 door Volkswagen ter beschikking gesteld, maakte het mogelijk ter plaatse leisteentafels door te lichten. De fossielinhoud van de gewonnen platen kon slechts op de monitor worden vermoed. De scherpere negatieven konden hier helaas niet worden gemaakt. Een opzienbarende ontdekking van Mevrouw Stürmer waren de eerste echte landplanten, die vanaf het land afkomstig waren en in zee fossiliseerden.



Afb. A. Een nog niet beschreven spons toont zijn karakteristieke skelet als "net" van sponsnaalden. Eromheen vele tentaculieten. Afm. 42 x 30 mm.



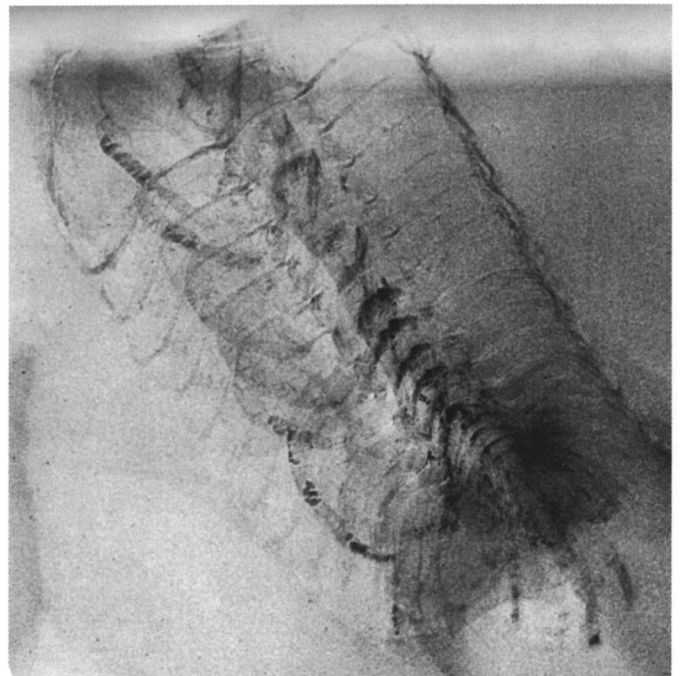
Afb. B. Een U.P.O. (unidentified paleontological object). Dit fossiel heeft de vorm van een bisschopstaf en doet op het eerste gezicht aan een enkele arm van een zeester denken. De röntgenopname maakt duidelijk dat de structuur hier niets mee heeft te maken en eerder een soort spons doet vermoeden. Afm. 20 x 4 mm.

De talrijke publicaties van Stürmer hebben Bundenbach wereldberoemd gemaakt. Nergens anders komt een zo rijke fauna uit het Devoon voor. Sommige organismen zijn zelfs nog niet beschreven, zoals de spons en de U.P.O. (unidentified paleontolo-



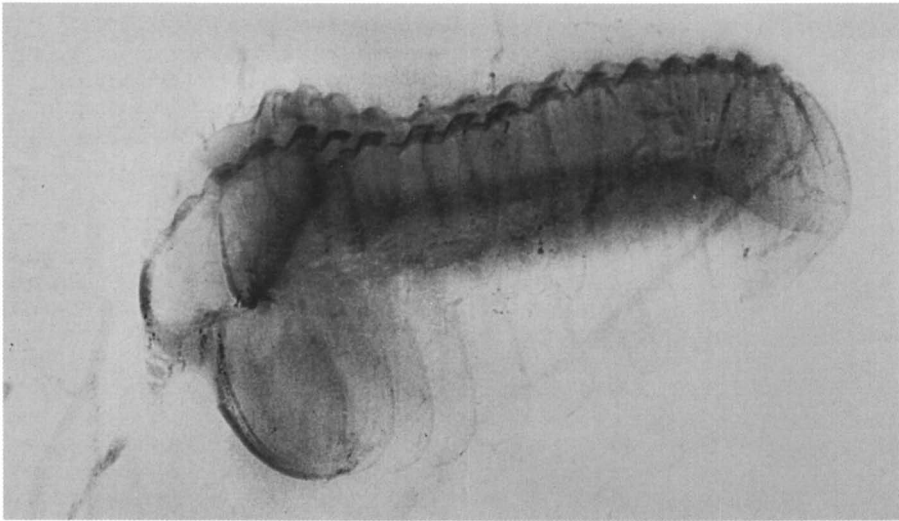
Afb. C. Deze nog niet beschreven borstelwormen hebben 12-14 schijnvoetjes. De dunne borstels zijn goed zichtbaar. De röntgenopname toont details in de kop, die niet aan het fossiel zelf zijn te onderkennen. Let ook op de ronde tot ovale structuren rondom de wormen (coprolieten?), die vaak samen in de leisteentafels worden aangetroffen en hebben geleid tot het vinden van meer exemplaren. De wormen zijn 25 en 24 mm lang.

gical object) van afb. A en B en de borstelwormen van afb. C. Stürmer was in staat om de morfologie van de soms merkwaardige arthropoden (nauwkeuriger) te beschrijven. In het bijzonder de ontdekkingen van weke delen berusten op zijn toepassing van de röntgentechniek. Voorbeelden van dergelijke organismen zijn kwalen en (borstel)wormen. Maar ook de inwendige delen van in het bijzonder de geleedpotigen zijn door Stürmer aangetoond. Bij de trilobieten zijn het de maag in de kop, de lichtgeleidingskanalen tussen de facetogen en de hersenen en het darmkanaal. Zie ook *Gea*, vol. 34, sept. 2001 en de trilobieten van afb. D en E.



Afb. D. De trilobiet *Chotecops ferdinandi* (vroeger: *Phacops ferdinandi*) toont linksboven een stuk van één van de antennes (parelachtig snoer), de pootjes in verkrampde doodshouding en deels de spieren/gewrichten daarbinnen. Afm. 70 x 30 mm.

Bij de op de Cambriëse Burgess Shale lijkende primitieve vormen van geleedpotigen (*Cheloniellon* en *Mimetaster*) en zeespinnen (*Palaeoisopus*) zijn de spieren en gewrichten in de poten zichtbaar. Afb. F. Zie voor *Mimetaster* ook *Gea*, vol. 30, juni 1997, nr 2. De inktvis *Eoteuthis* uit Gemünden is met zijn vangarmen, tong en vin bewaard gebleven. Hoewel een aantal observaties van Stürmer later moest worden gecorrigeerd, dan wel in discussie is, wordt door de meeste paleontologen de pyrietconservering van weke delen voor mogelijk gehouden. Later zijn ook



Afb. E. Dit exemplaar van de gravende trilobiet *Parahomalonotus*, met dertien borstsegmenten, laat voor het eerst pyrietconservering van weke delen zien, namelijk het maag-darmkanaal. Op de grens van borst en staartstuk is het darmkanaal omgebogen. Afm. 85 x 45 mm. Het fossiel is afkomstig uit Spaanse Ibero-leisteen.



Afb. F. Dit exemplaar van de zeespin *Paleoisopus problematicus* is zeer goed bewaard gebleven en gepyritiseerd. Let op de spieren en gewrichten in de grote scharen middenvoor en de poten. Achter de scharen bevindt zich de ronde oogheuvel. In het stekelvormige staartstuk (telson) is de ruitvormige anus zichtbaar. Grootste afmeting 147 mm. Rondom de zeespin bevinden zich enkele jeugd-exemplaren van sterdieren. Het krasje bovenaan zit in het röntgennegatief en illustreert dat hiermee voorzichtig moet worden omgegaan.

meer ontdekkingen van weke delen, bijvoorbeeld onder de inarticulate brachiopoden ("*Orbiculoidea*" en *Lingula*), bekend geworden. Hier betreft het de originele stelen, die uit spierweefsel bestonden, resp. bestaan. Nog steeds zijn nieuwe ontdekkingen mogelijk, zoals de recent aangetoonde voetjes bij de slangster *Taeniaster* bewijzen.

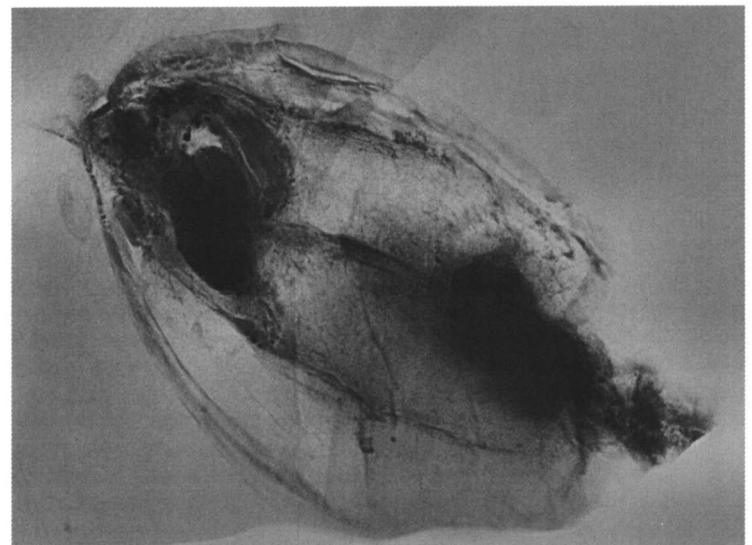
Materiaalkeuze

De hier afgebeelde röntgenopnamen werden in diverse ziekenhuizen en een radiologische praktijk vervaardigd. Daarbij bleek niet zozeer de apparatuur maatgevend, maar wel de film. Deze moet een goede scherpteweergave en redelijk wat contrast mogelijk maken. Een goed resultaat werd bereikt met de voor mammografische doeleinden ontwikkelde emulsiefilms, zoals van Du Pont Cronex. Geringe absorptieverschillen, die door de fijne voelsprietten van kreeften of de armen van zeelelies worden veroorzaakt, worden in dit geval uitstekend weergegeven. Afb. G en H. Om deze details voldoende zichtbaar te maken werd alleen met röntgenstralen belicht. Normaal in de medische radiologie is het gebruik van zogenoemde versterkingsschermen, die oplichten als er röntgenstraling opvalt. De film die tussen twee van die schermen ingeklemd zit wordt dan hoofdzakelijk door gewoon licht belicht. Dit bespaart de patiënt een flinke stralendosis, maar het

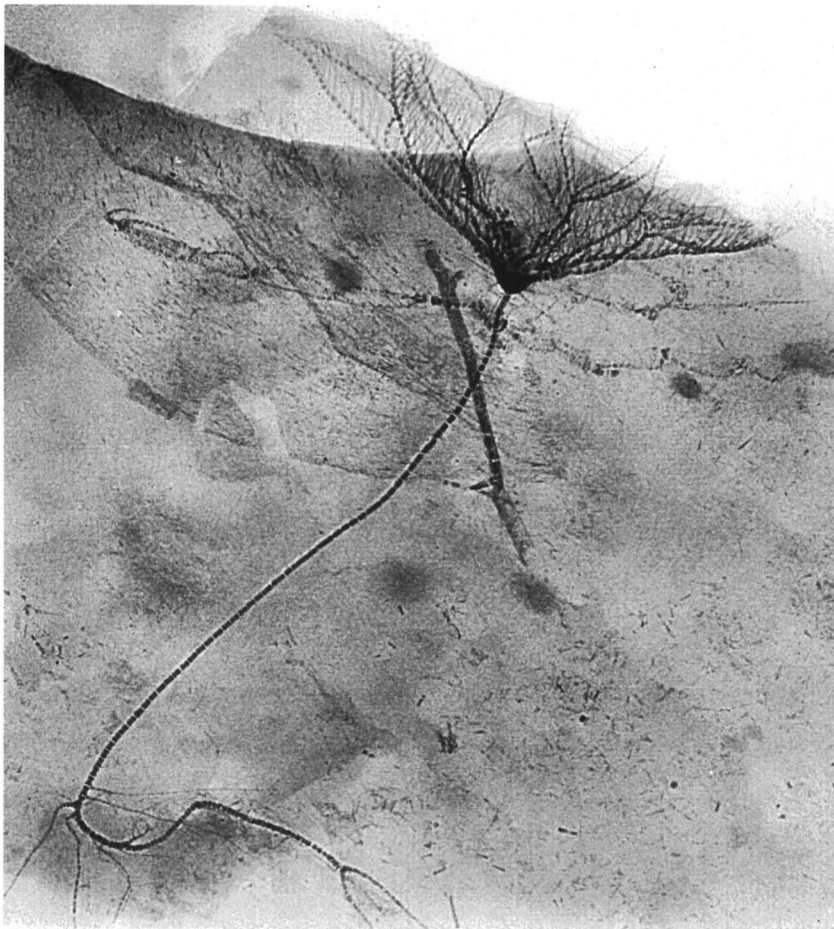
gaat ten koste van de scherpte van de opname. De medici kunnen hier kennelijk mee leven, want hun diagnose blijkt mogelijk. Aangezien kanker bij de fossielen niet van toepassing is, maar een zo scherp mogelijke opname wel, werden louter röntgenstralen gebruikt die het eigenlijke fotografische effect bewerkstelligen.

Objectkeuze

Om een zo optimaal mogelijke opname van een leisteenfossiel te verkrijgen dient allereerst de matrix, waarin het fossiel is ingebed, aan een aantal voorwaarden te voldoen. Ter voorbereiding op de opname wordt de plaat zo dun mogelijk gespleten. Platen dikker dan 8 mm zijn sowieso moeilijk op te nemen, want deze vereisen een hoger kilovoltage en daarbij ontstaat hinderlijke strooi-straling. Deze moet zoveel mogelijk worden voorkomen, want beïnvloedt het waarnemen van details nadelig. Het oppervlak van de plaat moet egaal zijn om een gelijkmatige belichting van het fossiel te verkrijgen. Het prepareren moet dus, waar mogelijk, pas na de röntgenopname starten om te voorkomen dat de lei op en om het fossiel wordt weggeschrapt. Hierdoor



Afb. G. Kop-borstschild van de pijlstaartkreeft *Dilophaspis (Nahecaris)*. Vooraan zijn de beide ovale steelogen te herkennen. De zwarting, vooraan in het schild, zijn de kaken. Midden in het schild verloopt het maag-darmkanaal. Afm. 100 x 60 mm.



Afb. H. Deze opname toont hoe rijk aan fossielen de Hunsrückleiste in bepaalde formaties kan zijn. Hier liggen een zeelelie **Hapalocrinus**, de kelk van een spons, een jeugd-exemplaar van de zeespin **Paleoisopus** en een plantenrest dichtbij elkaar. De zeelelie bezit stekels onderaan de kelk. Afm. 110 x 52 mm.

voorbeeld schaaldieren zijn dus ongeschikt. Anderzijds is van relatief dikke fossielen, zoals pantservissen en trilobieten, vaak louter een egale zwarting te zien, zodat ook deze door onvoldoende contrast veelal geen geschikte objecten zijn.

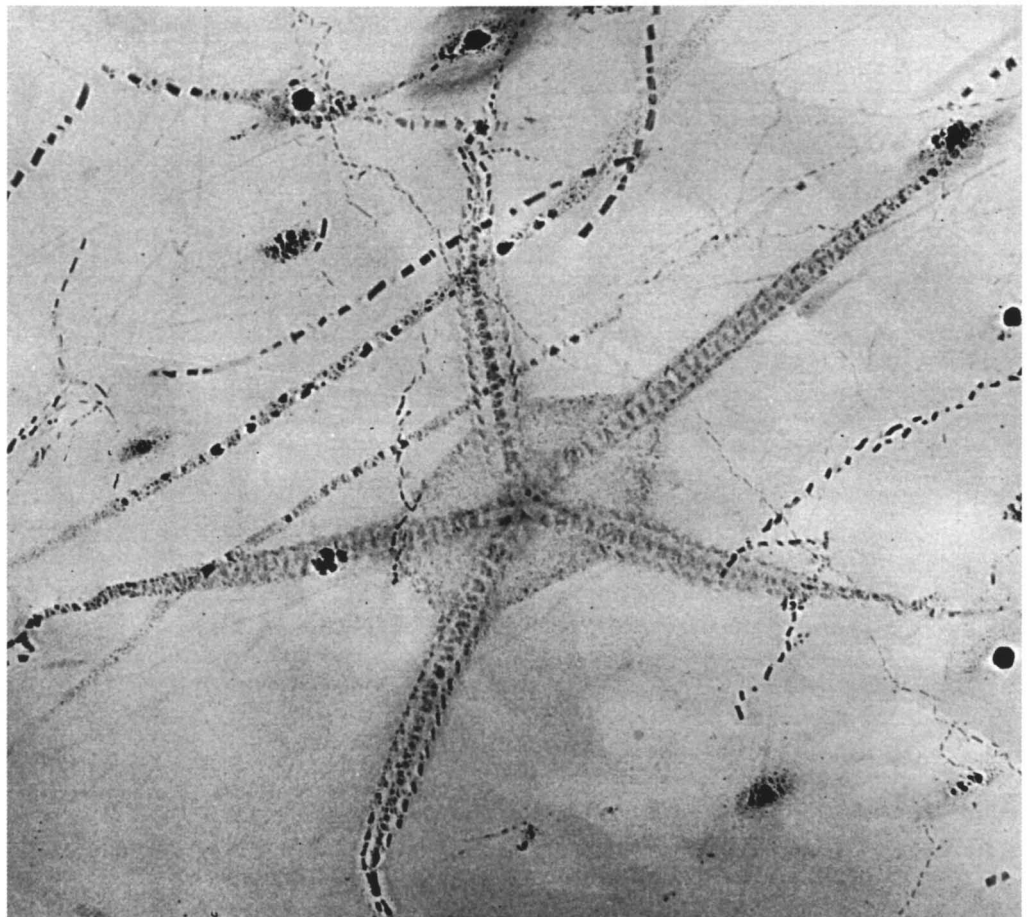
Werkwijze

Gegeven de relatief constante samenstelling van de Hunsrückleiste is de belichtingstijd alleen afhankelijk van de dikte van de lei. De film wordt machinaal in een lichtdichte cassette verpakt en op tafel gelegd. Zie afb. 1. De gevoelige laag wijst naar boven naar de röntgenbuis. Onder de film bevindt zich een loden plaat om een sluiereffect van de film, door strooi-straling vanaf het tafelblad, te voorkomen. De stralen gaan immers dwars door de leiste, de film en het tafelblad heen. Bij de opnamen wordt een focus-film-afstand van 90 cm aangehouden. De leiste-plateau wordt op de film-cassette gelegd en nu kan zich iedereen veiligheidsshalve buiten het bereik van de straling begeven, c.q. afschermen. Tenslotte wordt aan het bedieningspaneel de belichting ingesteld en kan de opname worden "geschoten". De onderstaande tabel geeft een idee van enkele gemiddelde belichtingstijden:

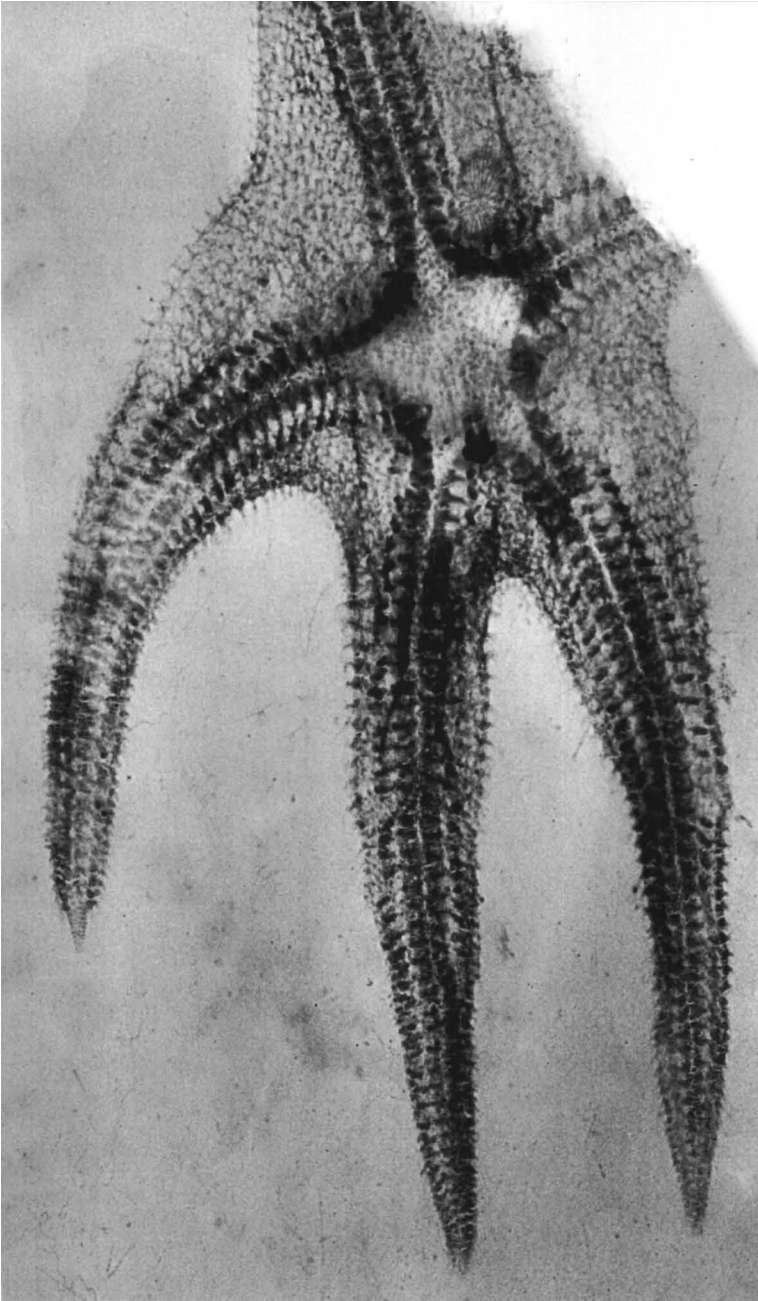
ontstaat een uitholling, die niet-compenseerbare belichtingsverschillen veroorzaakt.

Voorts moeten ook de fossielen aan bepaalde eisen voldoen.

Slangsterren en zeesterren met uitgespreide armen kunnen prachtige röntgenfoto's opleveren. Zie de achterplaat van dit nummer en ook afb. I en J. Liggen meerdere exemplaren over elkaar heen, dan is het beeld moeilijk te interpreteren. Eventueel worden storende objecten (zoals tentaculieten of trilobietenpleuren) aan de achterzijde van de plaat verwijderd. Zeer maatgevend is de dikte van het fossiel. Enerzijds moet er voldoende pyriet aanwezig zijn om het fossiel te kunnen opsporen. Schaduwen of afdrukken van bij-



Afb. I. De slangsterren **Taeniaster beneckeii** en **Miospondylus rhenanus** lijken veel op elkaar. Eerstgenoemde wordt meestal met gekromde, laatstgenoemde met gestrekte armen gevonden. Mogelijk komt dit door de stijfheid van het skelet, preciezer gezegd de binnenste ambulacrale plaatjes, die bij **Taeniaster** alternerend en bij **Miospondylus** naast elkaar staan. De röntgenfoto bevestigt het laatste en dus de juiste determinatie als **Miospondylus**. Afm. 90 x 80 mm. Merk ook de pyrietvorming van andere organismen op die het beeld storen.



Afb. J. Op de röntgenopname van de zeester *Compsaster* sp. is tussen twee armen de geribbelde madreporenplaat (= de sponsachtige inlaat van het watervatsysteem), de grove structuur van de schijf en de opnieuw aangegroeide spits van de linkerarm goed te herkennen. Afm. 180 x 90 mm.

last but not least een prepareercursus geboden. Twee ruwe fossielen kunnen door de deelnemers onder begeleiding zelf worden blootgelegd en na afloop mee naar huis worden genomen. Meer informatie vindt u in het internet onder www.hunsrueck.com/suedkamp, www.ferienland-hunsrueck.de/suedkamp en www.hunsnet.de/fh/suedkamp, of verkrijgt u telefonisch onder nummer 0049 6544 9093.

Literatuur

- W.M. Lehmann (1957): Die Asterozoen in den Dachschiefern des rheinischen Unterdevons. In: Abhandlungen des Hessischen Landesamtes für Bodenforschung, Heft 21, 160 pp.
- J. Sternvers-van Bommel en W.H. Südkamp (1989): Bundenbachnummer, Gea, vol. 22, nr. 1.
- W. Stürmer: Acht Röntgenopnamen van unterdevonischen Fossilien in Hunsrück-Schiefer. Een uitgave van Siemens Aktiengesellschaft, Afdeling Medizinsche Technik, Erlangen, zonder jaartal, in map.
- W. Stürmer, F. Schaarschmidt & H.-G. Mittmeyer (1980): Versteineretes Leben im Röntgenlicht. In: Kleine Senckenberg-Reihe Nr. 11, Frankfurt am Main, 80 pp.
- W.H. Südkamp (1997): *Mimetaster*: een merkwaardige geleedpotige uit Bundenbach (Dld). In: Gea, vol. 30, nr. 2, pp. 45-48.
- W.H. Südkamp (2001): Bundenbach: meestal arm, soms rijk. In: Trilobietnummer, Gea, vol. 34, nr. 3, pag. 22-29.
- Siemens. Versteineretes Leben im Röntgenlicht. Eine Sonderausstellung des Siemens-Museums München in Zusammenarbeit mit Prof. W. Stürmer, zonder jaartal, 51 pp.

Herkomst van de geröntgende objecten

Afb. A, B, E, F, H en I: collectie-Wouter Südkamp, Bundenbach; de achterplaat, afb. C, G en J: collectie-Gregor Beicht, Bundenbach; afb. D bevindt zich niet meer in Bundenbach.

Dikte leisteenplaat	Belichtingstijd	
	kV ¹⁾	mA/s ²⁾
3 mm	42	10
6 mm	42	40
10 mm	42	60

1) kilovoltage

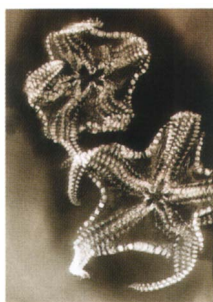
2) milliampère per seconde

N.B. Bij het bepalen van de belichtingstijd is het vermogen (het kilovoltage) constant gehouden en de stroomsterkte (milliampère per seconde) aangepast. Hetzelfde effect wordt natuurlijk ook andersom bereikt.

De filmontwikkeling gaat automatisch en na drie minuten "spuugt" de machine het negatief uit.

Slot

Wie na lezing van dit artikel zin heeft gekregen om zich in de praktijk eens met bijvoorbeeld de Hunsrückleiste en zijn fossielen bezig te houden, wordt aangeraden aan één van de geologische excursies van de auteur deel te nemen. Zo wordt op de excursie: "De wereldberoemde Bundenbacher leiste" op twee vindplaatsen naar fossielen gezocht, de ondergrondse bezoekersmijn bezichtigd, de collectie van de auteur bekeken en



Achterplaat: twee exemplaren van de slangster *Euzonosoma tischbeinianum*, met door de stroming bepaalde ligging van de armen. Karakteristiek zijn de robuuste randplaten van de schijf en de relatief korte, brede armen. Op de röntgenopname is goed de bouw van de mondhoekstukken en de ligging van de madreporenplaat te zien.

Afmeting 12 x 8 cm.

Negatief of positief

De gepytitiseerde skeletdelen houden de röntgenstralen tegen en steken in een negatief beeld wit af tegen het omringende gesteente. Dit gesteente laat wél röntgenstralen door en geeft grijze tot zwarte tinten op de film te zien. Bij de achterplaat werden deze grijze tinten tijdens het computerproces in kleur omgezet.

Bij de afbeeldingen A tot en met J werd het negatieve (witte) beeld omgezet naar zwart. In computerterminen heet dit inverteren. Dit is iets anders dan wat bij het afdrukken op fotografisch papier gebeurt. Daar verschijnt het beeld ook in zwart, maar tevens in spiegelbeeld.