

nog steeds in het ultraviolette gebied, maar het opstapje is net breed genoeg om ook nog enig violet licht te absorberen. Het doorgelaten licht is daardoor enigszins geel gekleurd. Een concentratie van slechts 1 stikstofatoom op 100.000 koolstofatomen maakt diamant al geel.

Tenslotte

Op een laatste groep van kleurveroorzakende verschijnselen wordt hier niet verder ingegaan. Deze vinden hun ontstaan niet in de selectieve absorptie van licht door elektronen, maar in fysisch-optische effecten als lichtbreking, buiging, strooiing en interferentie van het licht.

Deze effecten worden in elk behoorlijk mineralenboek beschreven, zodat daarnaar kan worden verwezen.

Geraadpleegde literatuur

Nassau, K., oktober 1980, *The Causes of Color*, Scientific American.

Verder:

Burke, E.A.J., 1982, *Handleiding bij het propedeutisch practicum mineralen*, Vrije Universiteit, Amsterdam.

Jansen, drs. A.I. e.a., 1977, *BINAS Informatieboek VWO-havo*, Uitg. Wolters-Noordhoff, Groningen.

Middelhoek, prof. dr. ir. S., en ir. A. Oosenbrug, 1976, *Elektrotechnische materialen*, Uitg. Het Spectrum.

Illustraties van de auteur.

BIOTURBATIE

door drs. E.G. van Diggelen

Dieren die op de zeebodem leven onderhouden nauwe relaties met het sediment. Het zand of slijk is voor veel van die zeebodembewoners een veilige plaats om zich in te verstoppelen. Ook is het sediment een voedselbron voor verschillende zeedieren.

In dit artikel zal nader worden ingegaan op de ruimtelijke relaties die tussen de zeedieren en het sediment bestaan en die men kan terugvinden in de vorm van sedimentaire structuurveranderingen.

Zowel de binnen het sediment levende dieren als de over de zeebodem kruipende verstoren de oorspronkelijke gelaagdheid, die tijdens de afzetting van de zandkorrels of de slijkdeeltjes is ontstaan. Deze omwerking van het sediment door een organisme noemt men **bioturbatie**; een biologisch-sedimentologisch proces dus, waarbij het gedrag van het dier een belangrijke rol speelt. Dit gedrag is in veel gevallen een reactie op erosie- of sedimentatieprocessen in het milieu.

Woelstructuren

De door bioturbatie ontstane structuren worden gekenmerkt door de afwezigheid van goed-ontwikkelde gelaagdheid. Lagen worden verstoord: gebogen, gebroken, verschoven. De primaire sedimentaire structuren die oorspronkelijk ontstonden door de werking van water of wind verdwijnen of herformerden zich tot **bioturbate structuren**, met of zonder duidelijke vorm.

Het grootste deel van de verstoringen vindt binnen het sediment plaats door woelende organismen. Zulke organismen zullen meestal sedimentbewoners zijn, zoals wormen en schelpdieren, maar kunnen ook door sedimentval bedolven dieren zijn die over de zeebodem kropen. Deze levend begraven dieren zullen zo snel mogelijk naar het nieuwe sedimentoppervlak vluchten en laten daarbij vluchtbanen achter.

Bioturbate structuren die door organismen binnen het sediment worden gevormd, door graven of woelen, noemt men **woelstructuren**. Hiertoe behoren bijvoorbeeld de

woelbouwsels (woon- en vraatbouwsels).

Woelbouwsels bezitten een duidelijke eigen vorm. Men noemt ze daarom **vormingswoelstructuren**. Uit die vorm kan men in veel gevallen het dier dat in het bouwsel heeft geleefd herkennen. Woelstructuren die bestaan uit een vervorming van de oorspronkelijke gelaagdheid, zonder dat er nieuwe vormen met een eigen omtrek voor in de plaats komen, noemt men **vervormingswoelstructuren**. Ze kunnen tot uiting komen in lokale laagombuigingen of een totale laagverstoring.

De mate van bioturbatie

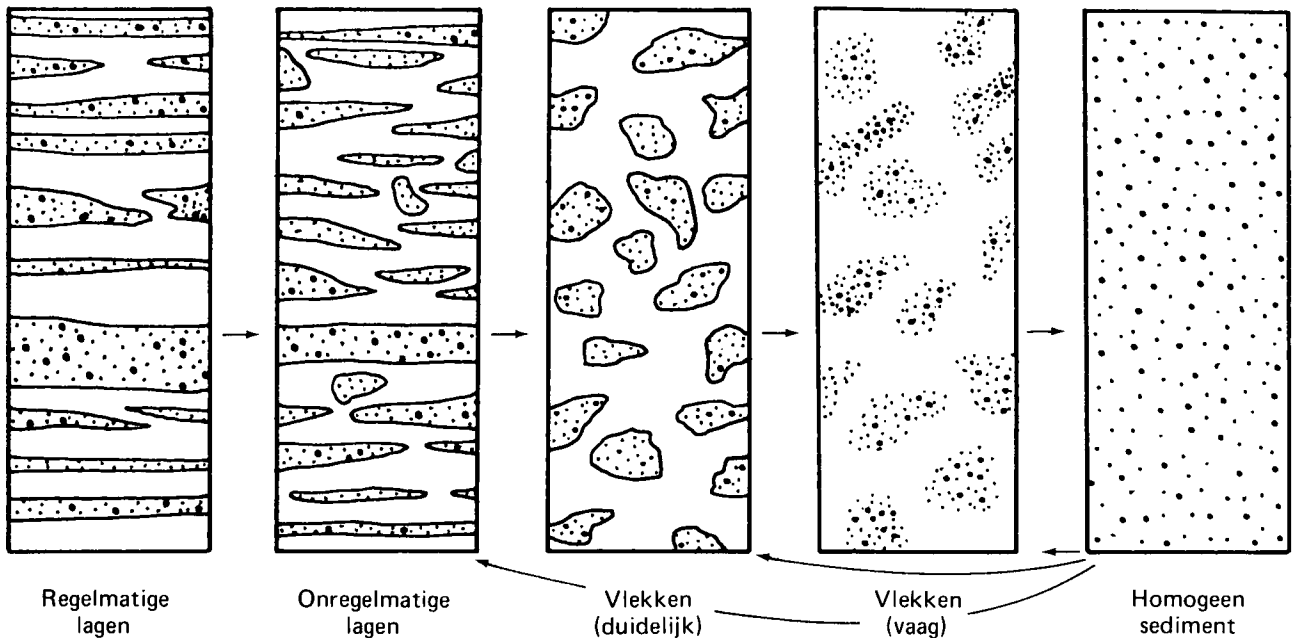
Afhankelijk van de mate of graad van bioturbatie ontstaan er uit regelmatige lagen met een parallelle gelaagdheid respectievelijk onregelmatige lagen en lenzen, vlekkerige structuren of structuurloze homogene sedimenten. Moore en Scruton (1957) ontwierpen hiertoe een kwalitatieve schaal (afb. 1).

Men kan de mate waarin een sediment door organismen wordt omgewoeld ook kwantitatief aangeven. Zo heeft men voor het Noordduitse waddengebied een kwantitatieve schaal opgesteld, waarin de graad van bioturbatie in een vertikaal profiel in percentages wordt uitgedrukt.

Van geringe bioturbatie spreekt men bijvoorbeeld als 5 tot 30% van het sediment is omgewerkt, terwijl dat bij zeer sterke bioturbatie 91 tot 99% is.

Het voordeel van zo'n kwantitatieve schaal is, dat de mate waarin een sediment onderhevig is aan bioturbatie exact kan worden vastgelegd. Op deze wijze heeft men wel kaartjes gemaakt, waarin de graad van bioturbatie voor een bepaald milieu is aangegeven.

De mate waarin het sediment door zeedieren wordt omgewerkt hangt in hoofdzaak af van de snelheid van erosie- of sedimentatieprocessen in het milieu en van het voorkomen van bodembewonende organismen. Beide factoren zijn bovendien onlosmakelijk met elkaar verbonden. Wanneer er immers voortdurend een snelle sedimentatie in het milieu plaatsvindt dan zullen zeebodembewoners schaars of



Afb. 1. De mate van bioturbatie uitgedrukt in een kwalitatieve schaal (naar Moore en Scruton, 1957.)

afwezig zijn, ook al zijn de andere milieufactoren (zuurstof, voedsel, temperatuur, etc.) gunstig.

Vooral de binnen het sediment levende dieren zijn bijzonder gevoelig voor erosie en sedimentatie.

Volgens Rhoads (1967) zou de samenstelling van een zeebodemfauna belangrijk zijn voor de mate waarin het sediment wordt omgewerkt. De faunadichtheid speelt maar een ondergeschikte rol. Bij zijn studie van wadpopulaties (borstelwormen) in Barnstable Harbor (Massachusetts, V.S.) kwam hij tot de conclusie dat na twee maanden gebieden met een lage dichtheid aan gravende wadpopulaties meer omgewerkt waren dan gebieden met een relatief hoge dichtheid. Vooral de bovenste 10 cm van het sediment was sterk omgewoeld. Een intensieve bioturbatie eist dus beslist geen hoge dichtheid aan gravende organismen.

Kijken we echter naar ons waddegebied, waar een groot aantal individuen voorkomen die tot een beperkt aantal soorten behoren, dan blijkt de grote voedselrijkdom op bepaalde plaatsen te leiden tot dichte wadpopulaties en een hoge graad van bioturbatie.

Wanneer we eens nagaan welke zeebodembewoners verantwoordelijk zijn voor de verstoring van de oorspronkelijke gelaagdheid, dan blijken dat zowel dieren te zijn die in woonbouwsels leven als aas- en sedimenteters, dieren die zich vrij op of binnen het sediment verplaatsen. Tot de eerste groep behoren de schelpdieren, die met behulp van sifo's van buiten het sediment voedsel en zuurstof opnemen. Sedimenteters halen daarentegen hun voedsel uit het bezonken sediment. Zowel wormen als zeeëgels houden er een dergelijke levenswijze op na. Aaseters kunnen zowel binnen het sediment voorkomen als daarbuiten. Hiertoe behoren bijvoorbeeld wormen en zeesterren.

Vluchtbanen

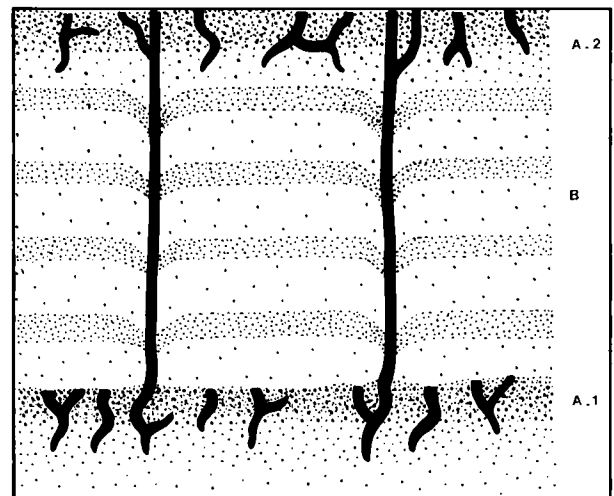
In een milieu waar snelle sedimentatie plaatsvindt, zullen bodembewonende organismen schaars of zelfs afwezig zijn. Dergelijke onrustige milieuomstandigheden doen zich bijvoorbeeld voor op de plaats waar een rivier in zee uit-

mondt. Door de plotselinge afname van de stroomsnelheid van het rivierwater bezinkt het grovere materiaal en wordt er een delta opgebouwd, waarbij de frontlagen een parallelle gelaagdheid vertonen. Ook in geulen kan sediment snel worden afgezet in horizontale lagen. Omdat er maar weinig bodembewonende zeedieren voorkomen zullen de lagen hun oorspronkelijke gelaagdheid behouden. De bioturbatiegraad is dan ook zeer gering. We treffen weinig of geen woelstructuren aan. Het kenmerkende structuurtype uit dit soort milieus is de **vluchtbaan**.

Vluchtbanen ontstaan wanneer over de zeebodem kruipende dieren door een plotselinge snelle sedimentatie worden verrast en genoodzaakt zijn om zo snel mogelijk naar het nieuwe sedimentoppervlak te vluchten.

Ook in wadsediment treffen we vluchtbanen aan. Bij stormvloed zal er immers een verhoogde aanvoer van sediment plaatsvinden, waardoor niet alleen de vrij be-

Afb. 2. Vluchtbanen van borstelwormen (bijvoorbeeld van de veelkleurige zeeduizendpoot) ontstaan als gevolg van snelle sedimentatie. De bewoningshorizont A-1 kon door enkele wormen worden verlaten en een nieuwe horizont A-2 wordt door deze wormen, samen met wormen van elders, aangelegd.



wegende dieren, maar ook de ingegraven schelpdieren en wormen naar boven moeten vluchten om geen verstikkingsdood te sterven.

Vluchtbanen onderscheiden zich van woon- en vraatbouwsels door hun vorm en aantal. Zo is de vorm van vluchtbanen bij de borstelwormen en de langspriet ongeveer rechthoekig en staat meestal loodrecht op de oppervlakte. Zo'n vluchtbaan is niet ingeslijmd en er ontbreekt meerwandigheid. Woonbouwsels daarentegen zijn meestal gebogen (struikvormig bij de veelkleurige zeeduizendpoot en U-vormig bij de langspriet) en ingeslijmd. Het aantal vluchtbanen is duidelijk minder dan het aantal woongangen in een nederzettingshorizont (afb. 2).

Elk organisme laat bij zijn vlucht maar één vluchtbaan achter, terwijl een organisme in een nederzettingshorizont meerdere gangen kan graven.

Zowel de langspriet (afb. 3) als de veelkleurige zeeduizendpoot (afb. 4) vluchten bij een sterke sedimentatie, waarbij gedacht moet worden aan het bezinken van meer dan 5 cm sediment, naar de oppervlakte of zelfs in het vrije water. In het sediment laten beiden een loodrechte vluchtbaan achter, waarbij de lagen rond de vluchtbaan naar beneden zijn gebogen. Als goede zwemmers zullen de dieren zich snel elders ingraven.

Veel sedimentbewonende schelpdieren zijn slechte woelers. Strandgapers en slijkgapers bezitten een verplaatsingssnelheid van ± 1 cm/dag, kokkels kunnen zich daarentegen in enkele minuten 4 cm verplaatsen. Bij te snelle sedimentatie komen veel schelpdieren om het leven doordat ze het nieuwe sedimentoppervlak niet op tijd met hun sifo's kunnen bereiken.

Vluchtbanen zijn paleoecologisch van groot belang, omdat ze reacties weerspiegelen van de betrokken dieren in het milieu. Sedimentologisch zijn het gevoelige graadmeters voor de mate van sedimentatie of erosie in het afzettingsmilieu.

Vlekken

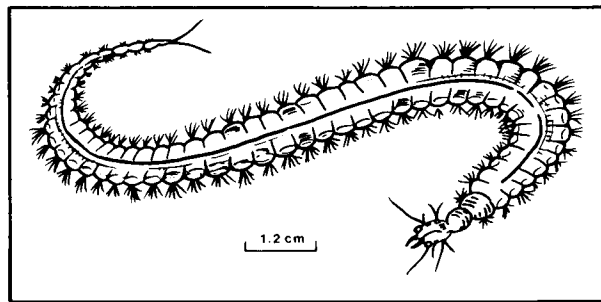
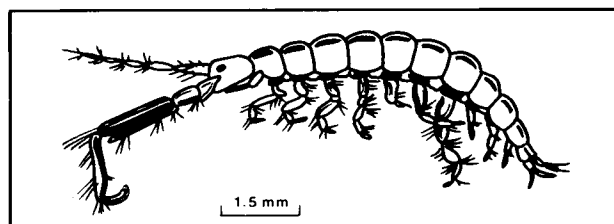
In milieus waar de sedimentatie minder snel verloopt of waarin lange sedimentatieloze perioden voorkomen zal de bioturbatiegraad toenemen. De horizontale gelaagdheid maakt plaats voor onregelmatige lagen of zelfs vlekken. Terwijl de onregelmatige lagen nog een duidelijk horizontale, lensvormige lengterichting vertonen, ontbreekt deze bij de vlekkerige structuren (afb. 1).

Vlekken kenmerken zich door hun onregelmatige vorm. Het zijn klonten sediment, omgeven door een matrix van tegengestelde kleur en textuur; bijvoorbeeld schone zandklonten in een matrix van zandige klei.

Sommige bezitten duidelijke grenzen, andere vage. De vaag begrensde vlekken kunnen bij een totale bioturbatie overgaan in homogene, structuurloze sedimenten.

De vorming van een vlekkerige structuur van het sediment vindt plaats in voedsel- en zuurstofrijke milieus, waar de bodembewonende organismen voldoende de tijd krijgen om

Afb. 3. De langspriet (*Corophium volutator*).



Afb. 4. De veelkleurige zeeduizendpoot (*Nereis diversicolor*).

het sediment sterk tot zeer sterk om te woelen. Dit gebeurt bijvoorbeeld aan onze Noordzeekust beneden de laagwaterlijn, in de lithologische overgangszone tot 10 à 15 meter waterdiepte. In dit bereik vindt afzetting plaats van siltig fijn zand. Een maximum aantal soorten en individuen zorgen er voor een zeer hoge graad van bioturbatie. Vooral veel wormen, zeeëgels en krabben doorploegen hier het sediment tijdens hun voedseltocht.

Veel vlekken ontstaan ook primair binnen het sediment, dat wil zeggen zonder de omwerking van reeds eerder afgezet sediment. Hiertoe behoren bijvoorbeeld de met uitwerpselen opgevulde graafgangen van wormen, de **wormgangen**. De ingeslijmde uitwerpselen zijn duidelijk van hun omgeving te onderscheiden door een verschil in kleur en textuur. Later optredende chemische reacties en diagenese kunnen dit contrast nog versterken.

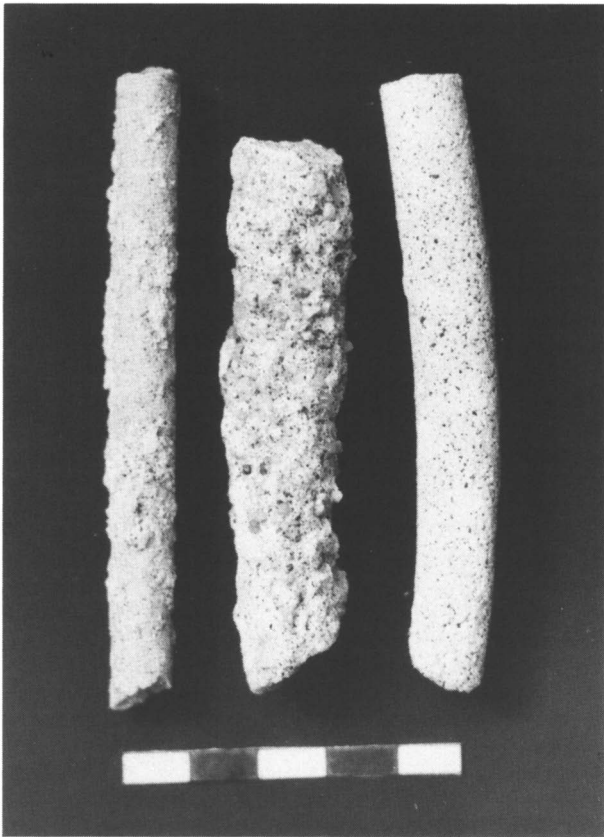
In Tertiaire zandgroeven vindt men veel fossiele wormgangen waarvan de gangopvullingen in sommige gevallen geopaliseerd kunnen zijn (afb. 5).

Niet alleen wormen, maar ook schelpdieren kunnen hun graafgangen opvullen. De gangopvulling bestaat echter niet uit uitwerpselen, maar uit sediment dat van buiten in de bouw is binnengedrongen. Uit aquariumproeven met sedimentbewoners bleek, dat de aard van de bouw aangepast is om binnengedrongen sediment te verwijderen of te verwerken. De in woonbouwsels levende schelpdieren kunnen het binnengedrongen sediment tegen hun gangwanden persen. We noemen dit "**bekleden**", dat wil zeggen dat de wanden van een laagje sediment worden voorzien. Op deze wijze houden de dieren hun graafgangen schoon. Zo schuift de strandgaper, die tot 30 cm diepte in het sediment leeft, de binnengedrongen sedimentaire deeltjes met zijn sifo deels uit het woonbouwsel, maar drukt tevens een deel tegen de wand, door verdikking van de sifo.

Het sediment wordt vervolgens ingeslijmd. Een dwarsdoorsnede door een oude sifonaalschacht van het schelpdier laat dan ook een afwisseling zien van concentrische lagen van zandig of slijkgig materiaal, overeenkomend met de volgorde van binnendringen. De wand kan soms wel 1 cm dik zijn. De dikte van de lagen is ongelijk, als gevolg van verschillen in de hoeveelheid binnengedrongen sediment op de verschillende tijdstippen.

Spreiten

Bij een geringe sedimentatie zullen de ingegraven organismen in de loop van de tijd hun bouw geleidelijk omhoog verplaatsen. Ze proberen de sedimentatiesnelheid bij te houden, waardoor hun vereiste leefdiepte voortdurend verandert. Op deze manier is er dus een gevoelige registratie in het sediment bewaard, waaruit men de sedimentatiesnelheid kan afleiden.



Afb. 5. Geopaliseerde wormgang-opvullingen (Archennes, België). De lengte van de schaalbalk is 5 cm.

Binnen het sediment kan er als reactie op de geringe sedimentatie of erosie een typische woelstructuur ontstaan, die men **spreiten** noemt, naar het Duitse woord "Spreite", en die vroeger beschouwd werden als fossiel zeewier. Men duidt er het oppervlak mee aan, dat tussen de verticale benen van een U-buis ligt en bestaat uit een herhaling van komvormige parallelle of concentrische fijne laagjes. Samen met de U-buis noemt men deze woelstructuur een **spreitenbouwsel** (afb. 6).

In onverhard sediment kan een spreitenbouw alleen met behulp van speciale methoden zichtbaar worden gemaakt. Bij fossilisatie echter prepareert de natuur de fijnere structuren uit en zien we tussen de benen van een U-bouw het gelamineerde gedeelte.

In de literatuur wordt een onderscheid gemaakt tussen **retrusieve** en **protrusieve spreiten**. Retrusieve spreiten ontstaan bij sedimentatie, waarbij in U-gangen levende zeedieren gedwongen worden naar boven te migreren om zo hun vereiste leefdiepte te behouden (afb. 6-links). Protrusieve spreiten daarentegen ontstaan bij erosie, waarbij de dieren naar beneden migreren (afb. 6-rechts).

Om te bepalen welk soort zeedieren verantwoordelijk zijn voor het ontstaan van spreitenbouwsels kan men kijken naar de gangopvullingen. Zo zullen met uitwerpselen opgevulde spreitenbouwsels in het slijk van een waddengebied ongetwijfeld door wormen zijn gemaakt. Vinden we echter geen uitwerpselen in de bouw dan zullen er vermoedelijk schelpdieren in hebben geleefd. Ook de langspriet of slikgarnaal (afb. 3) bewoont dergelijke U-vormige bouwsels. Het dier kan zowel in slijk als in zand worden aangetroffen. In het plastische slijk vindt men vaak spreiten, die ontstaan door herhaaldelijke bouwbekleding van het plafond en

tegelijktijd dieper doordringen van de U-benen (U onder U) in het sediment.

Deze protrusieve spreitenbouw ontstaat doordat het dier zijn volledige woondiepte alleen in stapjes in het slijk kan aanleggen, dus U onder U. Hierbij moet er voor de ademhaling voldoende watercirculatie plaatsvinden. In het zand kan de langspriet daarentegen zijn U-bouwsel in één keer tot zijn volledige woondiepte aanleggen. Als fossiele tegenhanger van de langspriet (*Corophium volutator*) wordt het ichnofossiel *Corophioides* genoemd, dat reeds vanaf het Cambrium bekend is. Dit U-vormige spreitenbouwsel staat steeds loodrecht op de gelaagdheid en is vrij kort.

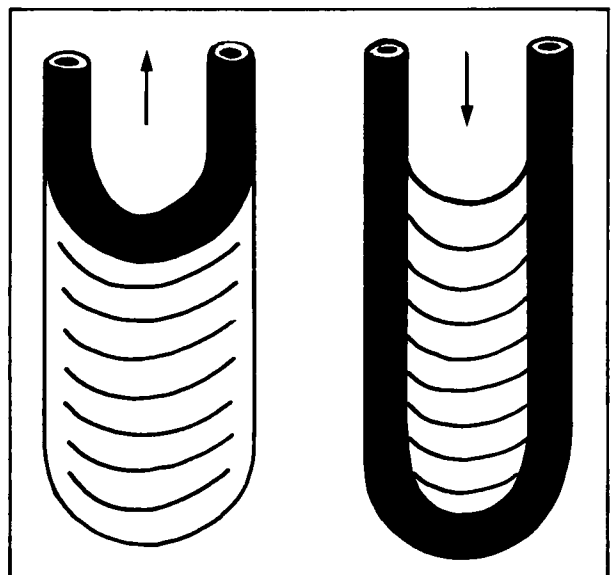
Ook in ons land komen fossiele spreitenbouwsels voor. Zoals in de Winterswijkse Muschelkalk, waar men twee typen U-vormige spreitenbouwsels van *Rhizocorallium jenense* Zenker 1836 kan verzamelen (afb. 7 en 8). Deze spreitenbouwsels werden in de Trias, zo'n 200 miljoen jaar geleden, gevormd. *Rhizocorallium jenense* bestaat uit eenvoudige U-buizen met spreiten, meestal protrusief. Vaak staan ze iets scheef op de gelaagdheid. De twee voorkomende typen verschillen in grootte. Of het wormbouwsels zijn is moeilijk te zeggen. Het is ook mogelijk dat er kreeftachtige dieren in geleefd hebben.

Homogene sedimenten

De homogene sedimenten (afb. 1) worden in eerste instantie gevormd door extreem snelle afzetting van sediment, zodat de tijd voor secundaire verstoring ontbreekt, of door de afzetting van sediment met een uniforme samenstelling en textuur. Daarnaast kunnen ze ontstaan door een complete omwoeling van het oorspronkelijke sediment door organismen (het proces van de **homogenisatie**).

Een complete doorgraving van het sediment vindt alleen plaats als de woelende zeedieren daartoe voldoende de tijd krijgen. Dus in milieus waarin een extreem langzame sedimentatie plaatsvindt of waarin er zo nu en dan nieuw sediment wordt aangevoerd. In dergelijke milieus moet er echter wel een voldoende hoeveelheid voedsel en zuurstof aanwezig zijn. Een bijna complete bioturbatie kan wel plaatselijk voorkomen in de lithologische overgangszone

Afb. 6. Spreitenbouwsels. Links: U-buis met retrusieve spreiten. Rechts: protrusieve spreiten.



voor de kust of in bepaalde delen van het waddengebied. Meestal vindt er in het waddenmilieu nooit een totale verstoring van de oorspronkelijke gelaagdheid plaats. Voordat de dieren, hoe talrijk ze ook mogen zijn, de totale gelaagdheid kunnen verstoren, treedt er al weer nieuwe afzetting of erosie op. De fysische processen hebben steeds een voorsprong op de bioturbatie.



Afb. 7. *Rhizocorallium jenense*, 1e type (Winterswijk).



Afb. 8. *Rhizocorallium jenense*, 2e type (Winterswijk).

Waarnemingsproblemen

Van de woelstructuren vindt men een grote hoeveelheid fossiel terug. Bij dergelijke fossiele structuren is het opvallend dat de fijnere details, zoals bijvoorbeeld spreiten, goed zichtbaar zijn. Dit is het gevolg van de opvulling van het bouwsel binnen het sediment met andersoortig materiaal. Door later optredende diagenese steken de opvullingen daardoor goed af tegen de omgeving en is de structuur vrij snel te herkennen.

Anders is het met de recente woelstructuren. Deze zijn meestal niet zichtbaar, wat de oorzaak is dat nog niet alle fossiel bekende woelstructuren teruggevonden zijn in de recente sedimenten. Zonder de toepassing van speciale onderzoeksmethoden krijgt men een verkeerd beeld van wat er in een marien gebied aan woelstructuren voorkomt. Tot de belangrijkste onderzoeksmethoden van woelstructuren behoren de kleurmethode, het onderzoek van slijpplaatjes, verhardingstechnieken en het onderzoek van gravende organismen in aquaria. In het laatste geval probeert men een zo natuurlijk mogelijk milieu te scheppen voor de dieren en gaat dan na hoe ze reageren op erosie en sedimentatie. Met behulp van röntgenstralen kan men op eenvoudige wijze de woelstructuren binnen het sediment waarnemen.

Terwijl de wetenschap al deze methoden toepast om de nog veelal onbekende woelstructuren binnen het sediment op te sporen, kan men als amateur-geoloog gelukkig op een veel eenvoudiger wijze de fossiele woelstructuren verzamelen. Vooral spreitenbouwsels zijn bijzonder opvallend. Helaas worden ze vaak over het hoofd gezien of als niet-interessant beschouwd. Wanneer men echter fossiele woelstructuren vindt, dan is het altijd goed om te realiseren dat het aanwijzingen zijn dat er miljoenen jaren geleden op de plaats van afzetting dieren hebben geleefd, die er hun strijd om het bestaan met de natuurkrachten uitvochten.

Enige literatuur

Häntzschel, W. (1975) – Treatise on Invertebrate Paleontology, Part W, Miscellanea, supplement 1: Trace fossils and problematica, The Geological Society of America, Inc. en The University of Kansas, 269 blz.

Moore, D.G. en Scruton, P.C. (1957) – Minor internal structures of some Recent unconsolidated sediments; Bulletin of the American Association Petroleum Geologists, Vol. 41, no. 12, 2723-2751.

Reineck, H.E., (1958) – Wühlbau-Gefüge in Abhängigkeit von Sediment-Umlagerungen; Senckenbergiana Lethaea, Band 39, 1-14.

Rhoads, D.C., (1967) – Biogenic reworking of intertidal and subtidal sediments in Barnstable Harbor and Buzzards Bay, Massachusetts; The Journal of Geology, Vol. 75, no. 4, 461-476.

Schäfer, W., (1962) – Aktuo-Paläontologie (nach Studien in der Nordsee); Verlag Waldemar Kramer, Frankfurt a.M., 666 blz.

■