

Inhoud:

Wat gebeurt er met zand?.....37	Wat is een mineraal?56
Mineralogie en Chemie: silicaten in formules gevangen46	Vulkanisme in Caribisch gebied59
Enkele interessante Noorse mineraal-voorkomens: Baziet; Smaragd.....51; 54	De GEA-Pionier XI: Determinatie van magmatische gesteenten, deel 362
	Nogmaals: Stereomicroscoop MBS-1066
	Database met Noorse vindplaatsen68
	Boekbesprekingento. 68

Wat gebeurt er met zand?

door Drs. W.C.P. de Vries *)

Zand als resultaat van verwerking, erosie en sedimentatie

Zand is een sediment. Dat betekent dat de bestanddelen, dus de zandkorrels, op de plaats waar wij ze nu vinden werden neergelegd, ofwel gesedimenteerd.

De korrels van het zand horen oorspronkelijk niet thuis op de plaats waar wij nu het zand vinden, het materiaal werd van elders aangevoerd. Dit vervoer gebeurt, zoals wij in de vorige aflevering hebben gezien, voornamelijk door water en wind; ook de zwaartekracht en het ijs behoren tot de 'transporteurs'. De korrels werden ergens door de vervoerende krachten opgepikt, zij werden, veelal in een andere vorm gevonden (groter, hoekiger, samen met andere mineralen als een gesteentefragment) op de plaats waar zij zijn ontstaan. Dit ontstaan gebeurde door de afbraak van bestaande gesteenten van de aardkorst door de verweringsprocessen.

Het afbraakmateriaal dat door verwerking beschikbaar komt wordt vervoerd en beweegt stroomafwaarts totdat het ergens in de luwte van de stromingen tot rust komt. Dan spreken we van afzetting of sedimentatie.

Mechanische processen

Als een zandlaag gevormd is door de rij van processen zoals hierboven genoemd dan bestaat dit sediment uit **klastisch terri-geen detritus**. Dit is dus: verplaatst afbraakmateriaal (= detritus), ontstaan door mechanische processen (= klastisch), afkomstig van gesteenten van het continentale landoppervlak (= terrigeen). Dit is dan in grote lijnen het mechanische proces van afbraak, transport en sedimentatie dat leidt tot de vorming van een zandlaag. Het resultaat is een sediment van een bepaalde samenstelling. Deze samenstelling kan zeer ingewikkeld zijn. Immers, vele verschillende gesteenten, soms van ver uiteen liggende plaatsen, kunnen het materiaal voor het sediment geleverd hebben.

Chemische processen

Verwerking van gesteenten heeft niet alleen maar als resultaat dat het gesteente mechanisch wordt gebroken: chemische processen komen er ook altijd wel aan te pas. Door de chemische verweringsprocessen zal er in het 'zoete' grond- en rivierwater altijd een groot aantal verbindingen zijn opgelost. Dit zijn zouten die we ook in het zeewater kunnen vinden. Deze zouten ontstonden door chemische verweringsreacties in gesteenten en bevinden zich in rivier- en grondwater. De zouten worden afgevoerd naar zee. Dit proces is reeds miljarden jaren aan de gang en heeft zo gezorgd voor het hoge zoutgehalte van het zeewater.

De zouten zijn ontstaan door chemische reacties in gesteenten en in principe zal niets de zouten tegenhouden om op hun beurt weer chemische reacties met gesteenten aan te gaan. Zo kan het grondwater dat door de gesteenten stroomt chemische bestanddelen aanvoeren in het gesteente en kunnen er reacties optreden die het gesteente zullen veranderen. En dan is het helemaal niet belangrijk of dit gesteente een laag zacht zand is of een harde graniet.

Veel van deze chemische reacties zullen zich afspelen in een reeds afgezet sediment.

Sedimenten zijn niet alleen opgebouwd uit terrigene detritus. In veel sedimenten vinden we ook andere typen van fragmenten, zoals fossielen of stukken van fossielen. Daarnaast kunnen korrels van bv. kalk en dolomiet rechtstreeks uit het zeewater neerslaan. Deze behoren dan, samen met gips en zouten, tot de evaporietdeeltjes.

Door de chemische reactie van het zure regen- en grondwater kunnen bepaalde fragmenten, zoals de kalkkorrels, oplossen en zo zal een kalkhoudende oplossing ontstaan. Deze opgeloste kalk kan op een andere plaats weer worden gebruikt voor chemische reacties in een gesteente.

Zo kunnen in een sedimentlaag op verschillende wijzen chemische processen optreden die de samenstelling, de bouw en het uiterlijk van het sediment veranderen.

*) Het eerste deel van dit zandverhaal verscheen als "Wat is zand?" in Gea, dec. 1994.

Textuur en structuur

Voordat we enkele eigenschappen van sedimenten iets nader bekijken is het goed om twee termen te noemen die van groot belang zijn voor het beschrijven van gesteenten: structuur en textuur. Het zijn termen die niet alleen worden gebruikt voor sedimenten, zij zijn net zo goed toepasbaar op metamorfe gesteenten en op stollingsgesteenten.

Structuur omvat de karakteristieke elementen van een gesteente op macroscopische schaal. Deze zijn te zien in een ontsluiting of aan het handstuk, bv.: gelaagdheid en gebandheid of gelamineerdheid, kruisgelaagdheid, convolutie, gegra-deerde gelaagdheid, de stroomribbels op het laagvlak van een sediment, de zuilvormige afzonderingsstructuren in een bazalt, de vloeistrukturen in een lava, de breuksystemen (diaklazen) in

een graniet, leisplijting, brecciatie, verplooiing, de foliatie van de gneis, enz.

Textuur omvat die elementen die op een microscopische schaal zijn te zien, soms nog met het blote oog. Maar over het algemeen moet tenminste de loop en veelal de microscoop erbij behulpzaam zijn.

Texturele elementen zijn: grootte, vorm, onderlinge relatie en samenstelling van de korrels in een sediment en van de kristallen in een stollings- of metamorf gesteente.

De verdeling van eigenschappen in texturele en structurele punten houdt ook weer een gevaar in: niet altijd is de grens tussen de beide groepen goed te trekken. Daarbij komt dat in andere talen, bv. in het Frans, deze termen precies omgekeerd worden gebruikt en dat in andere wetenschappen deze termen ook worden gebruikt in andere betekenissen.

Samenstelling en eigenschappen van het sediment

Een sediment is het resultaat van de samenwerking van een aantal processen:

1. een proces waardoor het materiaal is ontstaan. De samenstelling van het aangevoerde materiaal is van groot belang en dit heeft dus te maken met het oorsprongsgebied; dit wordt aangeduid als: de **herkomst** (*provenance*); daarnaast
2. de omstandigheden tijdens de sedimentatie, dus de eigenschappen ter plaatse: het **(afzettings-)milieu** (*environment*).

Het resultaat van deze processen vinden we in de eigenschappen van de sedimentlaag terug, zoals de **samenstelling** van het sediment en de **primaire sedimentaire structuren** van het sediment.

De herkomst van het sediment

De klastische sedimenten zijn residuen, het zijn de onoplosbare bestanddelen die overgebleven zijn nadat de verweringsprocessen het vaste gesteente hebben bewerkt.

Zoals we in het gedeelte "Wat is zand?" al hebben behandeld, is dat gedeelte van het 'residu' dat wordt opgenomen in het sediment en dus de verwerings- en erosieprocessen heeft overleefd, afhankelijk van een groot aantal factoren, zoals: het type van verweringsproces (dit hangt dan af van onder meer reliëf en klimaat) en daarnaast, welhaast vanzelfsprekend: de lengte van de tijd. Daarnaast zijn sedimenten ook nog eens uitgespoelde residuen. Het materiaal werd tijdens het transport gesorteerd, bv. in bepaalde groottefracties; daarbij trad vaak ook een scheiding op van de mineralogische componenten. Ook de voortgang van deze processen is afhankelijk van een aantal factoren, waaronder het soort erosieproces en de tijd dat dit werkzaam was. Dit is soms af te meten aan de afgelegde afstand van het detritus. Ook deze factoren werden reeds eerder aangestipt.

Rijpheid

Een van de termen die worden gebruikt voor de beschrijving van een sediment is de **rijpheid**.

Er worden twee verschillende soorten rijpheid onderscheiden, nl. A. de rijpheid in samenstelling en B. de texturele rijpheid.

Afb. 1. Zand bestaat voor een aanzienlijk deel uit kwartskorrels. Verder zijn er doorgaans veldspaten en kalkfragmenten aanwezig. De fractie met "zware" mineralen kan zeer uiteenlopend van samenstelling zijn. Op de afbeelding zijn te zien: ga = granaat; zi = zirkoon; st = stauroliet; mag = magnetiet; cas = cassiteriet; ky = kyaniet (ongeveer x 20). Verder: to = toermalijn; ru = rutiel; an = anataas; br = brookiet (80 - 100 x).
(Naar R.W. O'B. Knox in: *Petrology for students*, 1978)

A. De rijpheid, gebaseerd op de samenstelling, wordt bepaald door de verhouding tussen:

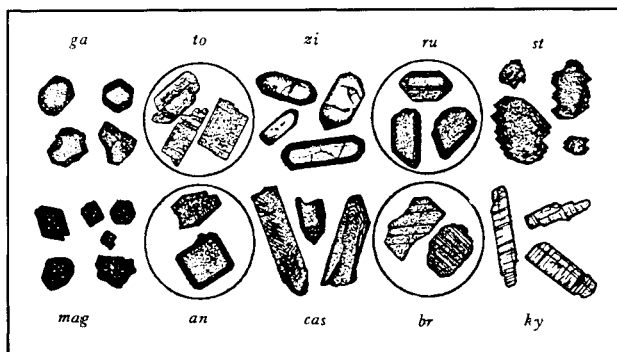
1. de hoeveelheid korrels van resistent materiaal, zoals kwarts, dat zowel veel verweringsprocessen als een intensieve erosie lang kan overleven, ten opzichte van:
2. de hoeveelheid aanwezige fragmenten die uit minder resistente materialen bestaan, zoals veldspaatkorrels, glimmers en andere 'splijters' of fragmenten van gesteenten. Deze fragmenten verdwijnen sneller door de verwerings- en erosieprocessen en de hoeveelheid kan dus een maat zijn voor de lengte en intensiteit van de denudatie. Zie afb. 1.

B. Punten die de texturele rijpheid bepalen zijn de mate van sortering van het sediment en de mate van afronding van de korrels. Sortering van een sediment houdt in, dat slechts een bepaalde grootte van de korrels werd vervoerd naar een bepaalde plaats, terwijl grover materiaal achterbleef en fijner materiaal verder werd getransporteerd.

Tijdens het transport worden de fragmenten natuurlijk door het voortrollen en botsen afgerond en krijgen de fragmenten een steeds idealere bol- of cilindervorm.

Hoewel beide factoren met elkaar verband houden, is de tijd waarin een goede sortering wordt bereikt veelal veel korter dan die welke nodig is voor het goed afronden van de fragmenten. Een rivier zal tijdens het transport de zandkorrels afronden, maar dit gaat veelal zo langzaam, dat de afstand die het zand aflegt met een grote rivier vanaf het brongebied naar zee onvoldoende is om een hoge mate van afronding te bereiken; daarnaast wordt een goede sortering al na een korte afstand bereikt. Een sediment dat bestaat uit goed afgeronde kwartskorrels kan alleen ontstaan als de kwartskorrels afkomstig zijn van sedimenten. Het is echter vaak noodzakelijk dat de kwartskorrels meerdere malen de cyclus van sedimentatie en erosie doormaken voor een goede afronding wordt bereikt.

Een voorbeeld kan worden gevonden in glaciële afzettingen (morenemateriaal) dat door smeltwater is uitgespoeld (de



'fluvioglaciale' sedimenten). De sortering kan hier vrij goed zijn terwijl de fragmenten nog sterk hoekige vormen tonen.

Een rijp sediment geeft aan dat het sediment gevormd is na een langdurige of intensieve verweringsperiode of een combinatie van beide; een duidelijk voorbeeld is verwerking onder een warm en vochtig klimaat in een gebied met weinig reliëf. Een voorbeeld zou kunnen zijn een uitgestrekte, ondiepe lagune, grenzend aan een vlak land (dat dus weinig detritus aanvoert) waar gedurende miljoenen jaren het zand op de bodem door de golven steeds heen en weer wordt gerold tot alleen de hardste korrels overblijven.

Echter, ook voor het trekken van een dergelijke schijnbaar voor de hand liggende conclusie moet wel iets verder worden gekeken: stelt u zich voor dat blijkt, dat in het herkomstgebied het grootste gedeelte van de aanwezige gesteenten zandstenen en kwartsieten waren! Verwerking en transport zullen dan, ook al hadden deze processen slechts weinig tijd beschikbaar, alleen maar een nog rijper gesteenten kunnen leveren.

Om te kunnen beoordelen wat de herkomst is geweest en hoe de verwerings- en erosieprocessen de samenstelling van het detritus hebben bepaald, is microscopisch-statistisch onderzoek nodig naar de variatie in de grootte van de korrels, de samenstelling en de mate van afronding van de korrels; daarnaast moeten de aanvoerrichtingen worden bepaald, de verdeling van land en zee gevonden; kortom, de geologische geschiedenis van de wijde omgeving van het voorkomen van dat bepaalde zandige gesteente. Daar komt nog bij dat niet alleen het herkomstgebied en het transport het uiteindelijke sediment vormen, ook de omstandigheden op de plaats van afzetting kunnen het resultaat beïnvloeden.

Het milieu

De omstandigheden op plaatsen waar afzetting plaats vindt kunnen wisselen. Daardoor zal het resultaat, in de vorm van het sediment, verschillen. Het aantal milieufactoren is enorm groot. Enkele daarvan zullen hebben meegewerkt bij de afzetting van het sediment.

In de eerste plaats is er de soort transporteur, hetzij wind, water of ijs. Daarnaast zijn de omstandigheden ter plaatse van groot belang, onder meer: stroomsnelheden van water of wind; waterdiepte; land, rivier of zee; shelf of diepzee; vorm van het landoppervlak of de zeebodem; temperatuur; zoutgehalte.

De combinatie van de factoren op een bepaalde plaats bepaalt

uiteindelijk de eigenschappen van een sediment. Deze som wordt aangegeven met de term **faciës**, bv. diepzeefaciës, lagunaire faciës, fluviatiele faciës, neritische faciës (op het continentale platform, de shelf), lacustriene faciës (in een meer).

Primaire sedimentaire structuren

De zogenoemde primaire sedimentaire structuren zijn het resultaat van de omstandigheden tijdens de sedimentatie. Enkele van de voornaamste factoren waardoor deze structuren gevormd worden zijn stroomsnelheid van water of wind en de grootte van de aanvoer en het soort van het detritus.

Lagen en laminae

De meest algemeen voorkomende primaire structuur van een sediment en het gemeenschappelijk kenmerk van vrijwel alle sedimenten is de **gelaagdheid**. Een gelaagd gesteente is in het algemeen dan ook synoniem aan sedimentair gesteente. Een uitzondering is bv. een moreneafzetting, die geen gelaagdheid heeft (naast een zeer slechte sortering, een zeer onrijpe samenstelling en veel hoekige fragmenten). Afb. 2. Hetzelfde geldt voor tilliet (fossiele moreneafzetting).

Een laag wordt gedefinieerd als: *een plaatvormige gesteente-eenheid van een bepaalde samenstelling, die met een duidelijke, scherpe grens in de vorm van een vlak is gescheiden van de onderliggende en bovenliggende eenheid.*

Er zijn sedimenten die een zeer duidelijke gelaagdheid tonen waarbij de lagen scherp van elkaar gescheiden zijn. Afb. 3. Bij andere formaties zijn de laagvlakken onregelmatig of slecht te onderscheiden. Er bestaan pakketten van een opvallend gelijkmatige gelaagdheid en met grote verschillen in laagdikten. Een verklaring van het ontstaan van laagvlakken is niet gemakkelijk te geven. Zij vertegenwoordigen - soms uiterst kleine - wisselingen in het sedimentatieproces.

Een opvallend mooie gelaagdheid komt onder meer voor bij de afwisseling van klei- en zandlagen die de zogenoemde 'Flysch'-afzettingen vormen. Deze sedimenten zijn langs de randen van vele gebergten afgezet: langs de Alpen, de Pyreneeën (bv. langs



Afb. 2. Jsschots met morenemateriaal in het smeltwatermeer van de Miage-gletsjer (Mont-Blancmassief, omgeving Courmayeur, Italië).

Afb. 3. (Links) Afwisseling van conglomeratische lagen met gelamineerde zandlagen in Buntsandstein-formatie ten noorden van Kall (Noord-Eifel). De zandige lagen vertonen kruisgelaagdheid.



de kust van de Golf van Biscaye) en de Betische Cordilleren (de Campo de Gibraltar). In de Fytsch-serie steken de hardere zandlagen uit en daardoor wordt de gelaagdheid geaccentueerd. Er zijn Fytsch-formaties bekend die een zeer regelmatige afwisseling tonen van lagen van enkele centimeters tot enkele decimeters dik.

Als een laag dunner is dan 1 cm wordt deze wel aangeduid als een **lamina** (mv. **laminae**). Laminae komen in eerste instantie voor in fijnkorrelige sedimenten als fijn zand, silt en klei. Het zijn kleine wisselingen in het sediment, zoals een afwisseling van fijn zand en silt, silt en klei, die kleine wisselingen in de omstandigheden van sedimentatie vertegenwoordigen, bv. van het klimaat gedurende het jaar. Een regelmatige laminatie geeft aan dat de omstandigheden tijdens de sedimentatie zeer rustig waren en dat het sediment is afgezet op een diepte waar golven en stromingen geen invloed hadden.

Tabel I

Gelaagdheid	dikte lagen
zeer dun (zeer dunbankig)	1 - 5 cm dik
dun (dunbankig)	5 - 60 cm dik
dik (dikbankig)	60 - 120 cm dik
zeer dik (zeer dikbankig)	120 - 200 cm dik
massief	> 2 meter
Gelamineerdheid	dikte laminae
gelamineerd	1 cm - 2 mm
dun-gelamineerd	< 2 mm

De interne structuur van een sedimentaire laag is van groot belang; vele structuren in een laag geven een duidelijke aanwijzing naar de omstandigheden tijdens de vorming. Zij helpen zeer goed om omstandigheden over grote gebieden te reconstrueren, bv. aanvoerrichtingen van het sediment, verdeling van land en zee, vorm van de oceaانبodem, verdeling van ondiepe en diepe zeeën.

Enkele van de belangrijkste structurele elementen zullen we nader bekijken.

Stroomgelaagdheid of kruisgelaagdheid

Kruisgelaagdheid wordt ook wel stroomgelaagdheid of kriskrasgelaagdheid genoemd. Deze structuur komt voor in zandige sedimenten die werden neergelegd onder invloed van een bewegend medium: **waiende wind** of **stromend water**. De vorming van een zandlaag met kruisgelaagdheid kan plaats vinden onder water, in een rivier of ondiepe zee (in het laatste geval veelal nabij de kust) of ook wel op het land waar winden waaien over een kaal landschap. Een typerende, op het land gevormde zandafzetting met kruisgelaagdheid is een duinafzetting langs een kust of in een woestijn.

Als het oppervlak van een rivierbedding, de zeebodem of het land bestaat uit zandig sediment, dan vertoont dit oppervlak altijd een ribbeling. Aan de achterzijde, de lijzijde van de ribbel (of een andere onregelmatigheid) kunnen zandkorrels, die door de stroming van het water of de wind worden voortbewogen, tot rust komen. Afb. 4A. Zo

kan achter een obstakel een laagje (*lamina*) van zandkorrels worden gevormd. Afb. 4B. Dit laagje zandkorrels heeft een hellingshoek met het horizontale vlak die rond de 30° kan bedragen. (Een hoek van 35° is de maximale helling waarop losse korrels kunnen worden opgestapeld.) De richting van de helling van de laagjes is daarbij **stroomafwaarts**. Bij een doorgaande aanvoer van zandkorrels zullen zich telkens weer laagjes op de lijzijde gaan afzetten. Zo kan een hele zandlaag ontstaan die bestaat uit dunne, hellende laagjes of laminae (afb. 4C). Wanneer de wind draait verloopt het proces in overeenkomstige richting. Hierdoor ontstaat een gekruiste ligging van de afzonderlijke eenheden. Bij het proces van de vorming van een kruisgelaagde laag kan het gebeuren, dat het neergelegde zand aan de loefzijde van de structuur weer door de wind of het water wordt opgenomen en weggevoerd. De zandrug wordt aldus aan de achterzijde geërodeerd. De opgenomen zandkorrels worden over de rug vervoerd en dan aan de lijzijde (voorzijde) weer neergelegd. Zo wordt een continue stroom van zandkorrels van de achterzijde naar de voorzijde van de structuur verplaatst en gaat de structuur zelf zich ook verplaatsen (afb. 4D). Zo ontstaan zandribbels, die zich over de zeebodem bewegen met de stroom mee en zandduinen, die zich over de duinbodem of de woestijnbodem voortbewegen. Een dergelijk bewegend of 'lopend' duin zal het land aan zijn voorzijde begraven met alles wat zich erop bevindt. Het is een ondoenlijke zaak om te proberen een dergelijke voortrollende massa te stuiten. Op kleine schaal kan dit verschijnsel worden gezien langs de zandverstuivingen op de Veluwe, waar bomen en struiken worden bedolven onder zandduinen die verscheidene meters hoog kunnen zijn.

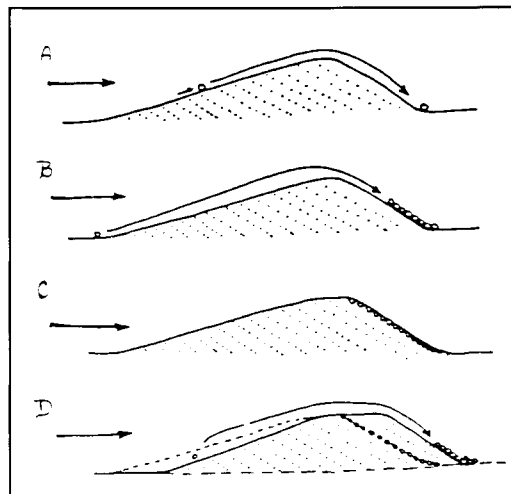
Ook in de duinen langs onze kust is vaak op plaatsen waar is gegraven of waar zand is weggewaaid de interne structuur van het duin goed te zien: deze bestaat uit een groot aantal kleine kruisgelaagde eenheden. Deze gelamineerde structuur, deze scheve gelaagdheid, kan in de zandlaag bewaard worden door de geologische geschiedenis heen. Vele miljoenen jaren later, ook als de zachte zandlaag in een harde zandsteen is veranderd, zal de structuur zichtbaar zijn en een getuigenis vormen van de omstandigheden, die lang geleden hebben geleid tot de vorming van de gesteentelaag. Afb. 5.

Het verschijnsel van een eerste duinvorming is te zien op een vochtig strand, waar het droge zand zich soms als heel kleine duinkammetjes van enkele centimeters diepte en een decimeter breedte over deze vochtige ondergrond voortbeweegt. De kruisgelaagde laag of ribbel zal in een rivier of in zee veelal een dikte bereiken van enkele decimeters; op het land kunnen duinen een hoogte bereiken van vele tientallen meters. Op vergelijkbare wijze ontstaan in de woestijn enorme duinen, die een hoogte kunnen bereiken van tegen de 300 meter en die tientallen kilometers breed kunnen zijn.

Een duin is asymmetrisch in doorsnede, de helling die naar de wind toegekeerd is, de loefzijde, is relatief vlak met een hellingshoek van bv. 10° of minder. Dit staat in sterk contrast met de lijzijde, waar de helling altijd tussen de 30° en 35° bedraagt.

Ribbels

Het is een natuurwet dat ieder oppervlak, waarlangs zich twee verschillende media met verschillende snelheid bewegen, een golfvorm gaat vertonen. Dit geldt dus zowel als water van de rivier stroomt over het zand in zijn bedding, als wanneer wind waait over water of over zand. Het duidelijkst is het verschijnsel bij de wind die over de oceaan waait: zo ontstaan golven. De hoogte van de golven en de afstand tussen twee elkaar opvolgende golfkruinen geven aan welke afstand de



Afb. 4. Kruisgelaagdheid. Zie de tekst.



Afb. 5. Kraskras-gelaagdheid, zoals deze in duinen kan voorkomen. Zandsteen van Jura-ouderdom, Cap Gris-Nez, NW-Frankrijk.



Afb. 6. Stroomribbels op het strand van de Boulonnais. De stroomrichting komt van links.

is het hoogteverschil tussen top en trog. De ribbel is dus een ideaal hulpmiddel in het vinden van stroomrichtingen van het water of de wind en van de aanvoerrichtingen van het sediment. Afb. 8 A.

De stroomribbel ontstaat zowel door waterstroming over zand als door de beweging van de wind over zand. Het oppervlak van het strand, van de ondiepe zee aan de kust, van de duinen langs de kust en van die in woestijnen zijn over grote oppervlakken bedekt door deze ribbels. Veelal zijn de ribbels kleine structuren, de lengte beweegt zich rond de 10 cm en de amplitude bedraagt een paar centimeter.

Soms kunnen zich veel grotere ribbels ontwikkelen. Vaak gebeurt dit in rivieren die intermitterend stromen en dan



Afb. 7. Versteende stroomribbels (ripple marks) in Devonische afzettingen bij Meerfeld (Eifel).

wind over het water waaide. Zo ontstaan de enorme brandingsgolven aan de kusten van de Stille Oceaan en de uiterst korte golfslag van de vroegere Zuiderzee, waardoor de meest doorgewinterde zeeman toch zeeziek kon worden.

Als een stroom (water of wind) over een zandlaag loopt zal er een ribbeling op het zandoppervlak verschijnen. Het is een proces dat zijn oorsprong vindt in hetzelfde mechanisme dat de kruisgelaagdheid vormt en beide structuren komen dan ook vaak bij elkaar voor.

Bij dit stromen over het zand ontstaan **stroomribbels** als lange, evenwijdig aan elkaar lopende ruggen, die vaak een opvallend constante afstand tot elkaar hebben. De ruggen zijn recht of slingeren enigszins; zij zijn loodrecht op de stroomrichting georiënteerd. Afb. 6 en 7.

De stroomribbel in zijn ideale vorm is asymmetrisch en heeft een lange, lage helling die stroomopwaarts is gericht en een steile helling stroomafwaarts. De lengte is de afstand tussen de overeenkomstige punten op twee opeenvolgende ribbels, de amplitude

opeens enorme waterhoeveelheden vervoeren. Deze ribbels kunnen verscheidene meters in lengte zijn.

Een tweede type van ribbel is de **golfribbel**. Deze komt alleen voor in sediment dat onder water is gevormd en daarbij in zeer ondiep water, niet veel meer dan enkele meters diep. Deze ribbels ontstaan in water dat heen en weer wordt bewogen door de invloed van golven.

De golfbeweging van water is in wezen een cirkelbeweging van waterdeeltjes; deze gaat over tot een heen en weer gaande, 'oscillerende' beweging in ondiep water. De golf- of oscillatieribbel is dan ook symmetrisch van vorm, hij heeft een scherpe kruin en een brede, zwak gebogen trog. Afb. 8 B. Deze ribbel heeft dus weinig waarde voor het bepalen van stroomrichtingen, wel is het een ideaal criterium voor het bepalen van de boven- en onderzijde van een laagpakket dat een zeer steile helling heeft of zelfs door plooibewegingen op zijn kop is gezet.



→ stroomrichting



Afb. 8 A. (Links) Stroomribbels; Afb. 8 B. (Boven) Golfribbels.



Afb. 9. Afwisseling van kleiige afzettingen en zandige turbidietlagen. De laatste zijn het hardst en het minst verweerd. Mioceen, Bekken van Nijar, ZO-Spanje.

De turbidiet

In de randgebieden van vrijwel alle gebergtegebieden op aarde komt op veel plaatsen een zeer karakteristieke sedimentserie voor, die bestaat uit een afwisseling van zandsteenlagen met kleiige of mergelige afzettingen. De dikte en verspreiding van de zandlagen kan sterk wisselen: de ene zandlaag is enkele centimeters dik, de andere soms wel een meter. Op de ene plaats komen er slechts enkele zandlagen voor tussen een pakket van vele meters kleiige gesteenten, op een andere plaats zijn er tussen een aantal zandlagen slechts dunne niveautjes klei aanwezig. De zandige lagen tonen een aantal karakteristieke structuren, die wijzen op zeer speciale omstandigheden tijdens de afzetting van deze lagen. Afb. 9.

Klei is een sediment dat op vrij grote diepte in zee werd afgezet: de waterdiepte bedroeg tijdens de sedimentatie vele honderden meters tot soms wel een paar kilometer. De zandsteenlagen erin vertonen kenmerken die wijzen op een afzetting in zeer ondiep water, tot zelfs in de strandzone, onder andere door de grofkorreligheid. Zij bevatten soms zelfs fossielen, onder meer van oesters en andere organismen die in ondiep water leven. Deze sedimentserie laat aldus een merkwaardige combinatie zien van een afwisseling van lagen diepzeesediment met lagen van materiaal dat nabij de kust werd neergelegd.

De verklaring voor dit raadsel werd gepresenteerd in 1929, toen ten zuiden van Newfoundland een aardbeving plaatsvond. Het epicentrum van de beving lag op de continentale helling, nabij de rand van de shelf. Op de plaats van het epicentrum lagen een dozijn telegraafkabels, die onmiddellijk braken. In de uren die volgden op de aardbeving braken er na elkaar nog vijf kabels die verspreid lagen op de voet van de continentale helling en op de diepzeebodem. De eerste brak een uur na de beving, deze kabel lag ongeveer 80 km van de plaats van de aardbeving. Drie uur na de beving brak een kabel die 250 km verder aan de voet van de continentale helling lag. De laatste kabel brak na dertien uur, deze lag op rond de 650 km van het epicentrum op de oceaانبodem. Het duurde nog 25 jaar voor uit boringen bleek wat de oorzaak was: door de aardbeving was een enorme massa sediment van de shelfbodem losgeraakt en als een onderzeese lawine van de helling afgerold naar de diepzeebodem. Het sediment heeft zich over de oceaانبodem uitgespreid over een oppervlak van meer dan 200.000 km². De laag was tussen de 70 en 120 cm dik. Het mechanisme waarbij sediment dat is opgestapeld op de shelf, daar wegzakt en afglijdt en in de vorm van een turbulente, kolken-de, lawine-achtige massa van in water zwevende sedimentdeeltjes (een suspensie) met een hoog soortelijk gewicht, van de

continentale helling naar de diepzeebodem stroomt, wordt de *troebelingsstroom* of *turbidiet* genoemd. De troebelingsstroom kan een snelheid van 80 kilometer per uur bereiken. De suspensie vervoert grof-zandig materiaal tot fragmenten van grind-grootte.

Zo wordt sediment, dat nabij de kust van het continent wordt neergelegd, getransporteerd naar de diepzee en vormt daar de 'vreemde' inschakelingen in de diepzeesedimenten.

De turbidiet-formatie die in de randzones van gebergten voorkomt wordt gevormd tijdens het begin van het ontstaan van een plooiingsgebergte. Op het moment dat door de plooiing van de aardkorst de eerste reliëfverschillen ontstaan, zullen vertering en erosie aan het werk gaan; de afbraakprodukten van het vormende gebergte worden langs de kusten neergelegd. Er wordt zoveel sediment in de ondiepe zee langs de kust opgestapeld dat er soms grote massa's gaan verzakken, losraken en als onderzeese modderlawines vanaf het kustgebied naar de diepere delen van de zee stromen.

Onderzeese modderstromen komen niet alleen voor op de rand van de continentale shelf, zij treden ook op aan de monding van grote rivieren en waar een rivier uitkomt in een meer. Het met slib geladen rivierwater stroomt over de bodem van (stuw)meer of zeebodem verder, soms over tientallen kilometers. Deze zware suspensie kan zelfs diepe kloven in de zeebodem uitslijpen.

De turbidiet transporteert materiaal van zandkorrel- tot wel grind-grootte naar de diepere zee, waar normaal slechts fijnkorrelig sediment (bijv. silt en klei) terecht komt. Zo vinden we tussen de kleiige sedimenten lagen van zand, die enkele centimeters tot vele decimeters dik kunnen zijn. Terwijl de kleis sedimentatie zeer langzaam gaat, bijv. slechts een enkele centimeter per eeuw, wordt een turbidiet-zandlaag in zeer korte tijd afgezet, bijv. binnen enkele uren.

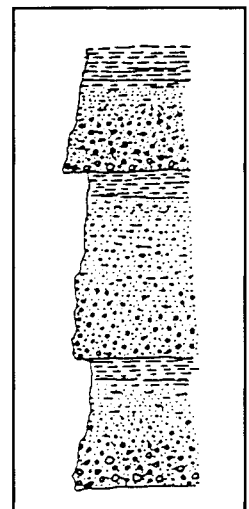
Gegradeerde gelaagdheid

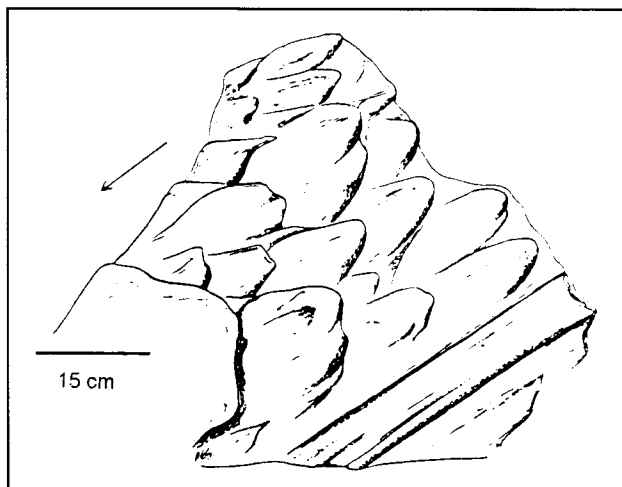
Als de turbidiet zich over de vlakke zeebodem verspreidt neemt de stroomsnelheid af, uit de troebelingsstroom zullen eerst de grootste fragmenten bezinken en in de loop van de tijd steeds fijnkorreliger materiaal. Een turbidietlaag is veelal grof-korrelig aan de basis, terwijl hoger in de laag de korrelgrootte kleiner is. De top van een turbidietlaag kan ongemerkt overgaan in het normale kleiige diepzeesediment. Dit noemt men *gegradeerde gelaagdheid*. Afb. 10.

De kleiige bovenzijde van een turbidiet bevat soms een grote hoeveelheid sporen van organismen die in het zachte, pas afgezette materiaal rondkropen, groeven, graasden, enz. Hoewel er in het algemeen niet veel fossielen in turbidieten voorkomen, was er dus vaak wel een grote verscheidenheid aan levende organismen. De sporen die zij achterlieten worden ichnofossielen genoemd. Een reden kan zijn dat de turbidiet voor vele organismen in de diepzee een rijke voedingsbodem vormde door het vele organische materiaal dat meegevoerd werd.

De turbidiet-stroom kan tijdens zijn woeste, turbulente stroming langs de helling van de zeebodem happen uit de zachte sedimenten van de zeebodem nemen. Grote fragmenten, die in de suspensie worden

Afb. 10. Gegradeerde gelaagdheid in een turbidiet: elke opeenvolging van grof naar fijn materiaal komt overeen met één troebelingsstroom.





Afb. 11 A. Uitstulpingen van de **onderkant** van een turbidiet in de zachte zeebodem, in het Engels *sole markings* geheten. 11B. (Rechts) Flute casts (harde opvullingen van groeven in de zachte zeebodem) aan de steilstaande onderkant van een turbidiet bij Relleu, omgeving Alicante, Oost-Spanje. De stroomrichting was vanaf de punt naar het brede gedeelte van de "flute".

meegevoerd, kunnen voren uitslijpen in het zachte slib. Deze 'happen' en 'voren' in de zeebodem worden later opgevuld met het materiaal van de turbidiet. Zo ontstaan er op het contactvlak van zeebodemsediment en turbidiet-afzetting een aantal bijzonder interessante sedimentaire structuren in de vorm van uitstulpingen van de onderzijde van de turbidiet, de zogenoemde *sole-markings*. Veel voorkomende structuren zijn worstvormige uitstulpingen aan de onderzijde van een turbidietlaag, deze worden *flute casts* genoemd. Afb. 11.

De structuren aan de onderzijde van een turbidiet kunnen de meest merkwaardige vormen aannemen en tonen een grote variatie in afmetingen. Mensgrote 'flutes' worden gevonden aan de basis van metersdikke turbidiet-lagen, zoals ten noorden van Alicante in oostelijk Spanje. Gebieden met uitgebreide turbidiet-afzettingen uit het Oligoceen en Mioceen vinden we onder meer aan de noord- en zuidvoet van de Pyreneeën, van de Apennijnen en in de 'Campo de Gibraltar' in Zuid-Spanje.

Secundaire sedimentaire structuren:

processen die plaats vinden na de sedimentatie van een laag of een groep lagen (formatie)

Is de sedimentlaag eenmaal neergelegd, dan kunnen er processen gaan werken die het uiterlijk en ook de samenstelling van het sediment zullen gaan veranderen. Deze processen kunnen van mechanische en ook van chemische aard zijn.

Mechanische processen

Het is goed te bedenken, dat ieder sediment dat op de zeebodem is neergelegd verzadigd is met water. Alle poriën zijn geheel met water gevuld. Als de korrels dichter op elkaar worden geperst, wordt de ruimte tussen de korrels, de poriënruimte, kleiner. Er zal dan minder plaats zijn voor het 'ingevangen' water, dat tijdens de sedimentatie tussen de korrels is achtergebleven. Hierdoor kunnen de primaire structuren sterk veranderen. Dit zal later worden behandeld onder *convolutie*.

Door het stapelen van nieuwe lagen sediment op een bepaalde laag treedt **drukverhoging** op. Daardoor zullen de korrels van het sediment op elkaar geperst worden. Dit is een van de manieren



van de **lithificatie**, de 'verstening' van het sediment. Zo kan een los sediment in een harde laag veranderen.

Een ander mechanisch proces is de **vervorming** door bewegingen, bv. door plooiën.

In combinatie met mechanische processen kunnen chemische reacties gaan optreden, die de oorspronkelijke samenstelling en vormen veranderen.

Door deze processen kan uit het zachte sediment een hard - geconsolideerd - sedimentair gesteente ontstaan, waarbij soms de oorspronkelijke eigenschappen en vormen van het sediment bewaard blijven. Dit proces is de **lithificatie** of **diagenese**.

Pas als er belangrijke veranderingen gaan optreden waarbij door hogere temperaturen en drukken chemische reacties optreden die de samenstelling en bouw van het sediment op een intensieve en fundamentele wijze veranderen, dan spreken we van **metamorfose**. En daarmee zijn we dan aangekomen in een andere hoofdgroep van de gesteenten van de aarde.

Niet altijd kan een duidelijk onderscheid worden gemaakt tussen de diagenetische en metamorfe processen.

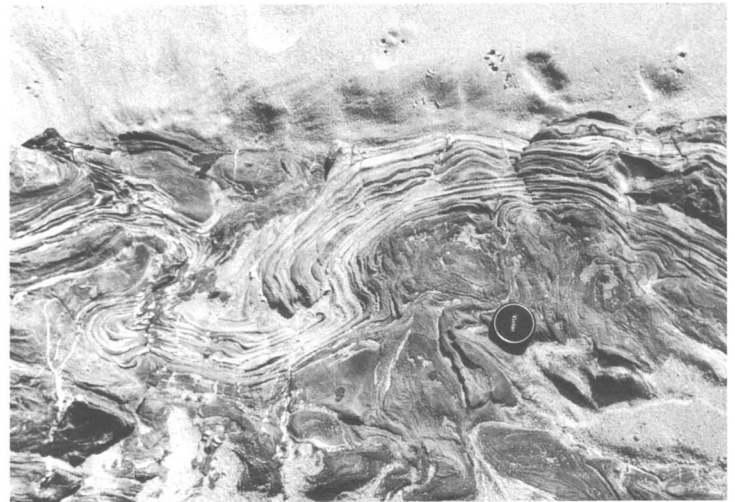
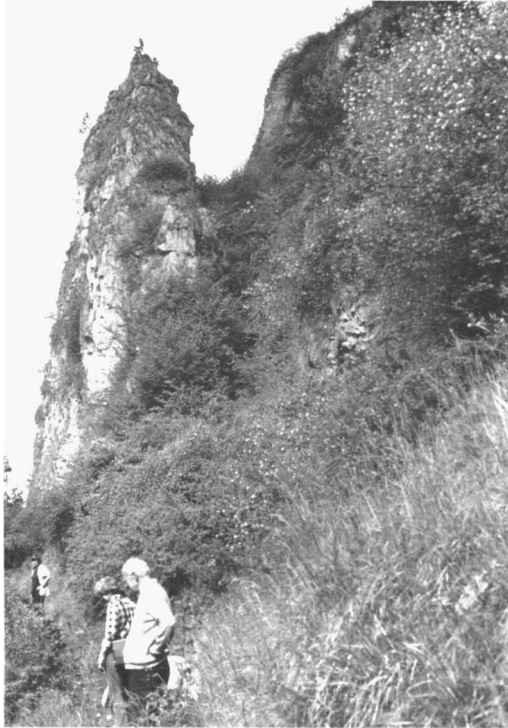
Chemische processen

Dolomitatie

Een bekende chemische reactie in een vers afgezet sediment is de dolomitatie: vers afgezet kalkslib reageert met de magnesium die in het zeewater is opgelost. Het resultaat is dat de calciumcarbonaat (de kalk) verandert in calcium-magnesiumcarbonaat (dolomiet). Bij deze reactie worden de oorspronkelijke structuren van de kalk vernietigd en treedt er een rekristallisatie op: in een dolomiet worden weinig fossielen gevonden. Dolomitatie is zichtbaar in de gesteenteserie doordat de gelaagdheid verdwijnt, het gesteente wordt zeer dikbankig tot massief. Daarnaast verdwijnen vele fossielen. Een mooi voorbeeld is de Munterley bij Gerolstein in de Eifel: hoe hoger we in de kalksteenserie komen, hoe sterker het gesteente is gedolomitiseerd. Alleen de stromatoporen-kolonies hebben er lange tijd de dolomitatie overleefd. Afb. 12.

Cementatie

Eén van de chemische processen is de cementatie, waarbij een mineraal tussen de korrels van het sediment wordt afgezet. Deze worden aan elkaar gemetseld: gecementeerd.



Afb. 12. (Links) De Munterley bij Gerolstein (Eifel). Het bovenste deel van de Devoonformatie is massief door dolomitatie: de oorspronkelijke gelaagdheid is door rekristallisatie verloren gegaan.

Afb. 13. (Boven) Convolute gelaagdheid in een sedimentpakket langs het strand van Tarifa (W-zijde parkeerplaats voor surfers), ten westen van Gibraltar (Zuid-Spanje).

Een bekende vorm van cementatie is die waarbij kalk tussen de kwartskorrels wordt afgezet. Van een zachte zandlaag kan zo een hard gesteente gemaakt worden. Cementatie kan over grote afstanden voorkomen: een bepaalde zandlaag kan geheel worden verhard, maar het verschijnsel kan ook zeer lokaal optreden, waarbij harde knollen ontstaan van centimeter-grootte tot vele meters doorsnede.

Bij dit proces van cementatie van een sediment door calciet zal deze kalk door het grondwater zijn aangevoerd. Deze kalk kan van een heel ander gebied komen, maar kan ook ter plaatse afkomstig zijn uit calciet- of dolomietfragmenten in het sediment, bv. van fossielen.

Bij het hier genoemde voorbeeld kan de cementatie door neerslag van chemische verbindingen tussen de korrels van een sediment op geheel verschillende tijdstippen plaats vinden. Er kan een lange tijd voorbij zijn gegaan tussen de afzetting van het sediment en de cementatie, maar dit proces kan ook snel na de afzetting gebeuren. Er zijn gecementeerde strandafzettingen bekend waarin scherven van flessen voorkomen.

Een ander voorbeeld van cementatie is de woestijnroos: veelal een gipskristal dat voor een groot deel bestaat uit zand. De 'roos' wordt, zoals de naam al zegt, voornamelijk gevonden in de (zand)woestijn. Gips, dat in het grondwater is opgelost, zal neerslaan in de grond als het water verdampst. In losse, zandige grond kan het gips een kristal gaan vormen waarin grote hoeveelheden zand worden opgenomen; dit kristal groeit verder om de zandkorrels heen. Hier wordt het zand gecementeerd door het gips.

Convolutie

Convolute structuren ontstaan door de reactie van zachte sedimenten op een toenemende druk wanneer nieuwe lagen sediment op het laagpakket gestapeld worden.

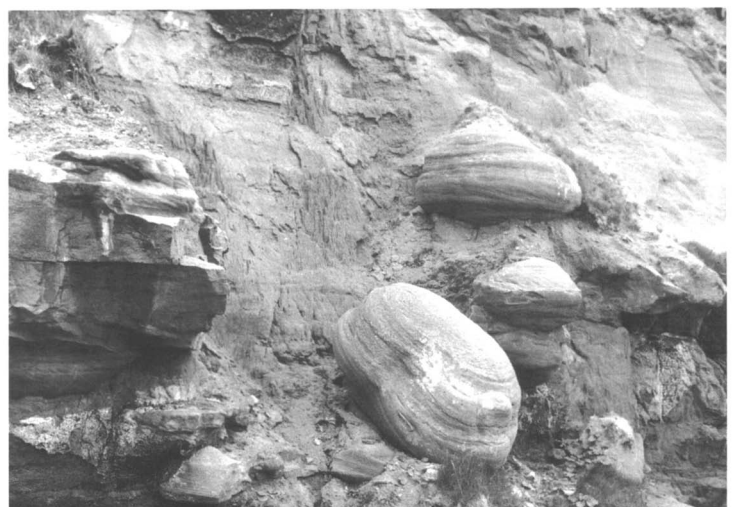
We zagen al, dat bij verse sedimenten in het algemeen alle poriën geheel gevuld zijn met water. Als de poriënruimte kleiner wordt zal een deel van dit ingevangen water uit de sedimentlaag moeten verdwijnen. Water kan maar naar één kant uit een laag ontsnappen: naar boven. Als deze

laag al met water verzadigd is, komen er problemen. Deze problemen zijn het meest opvallend in een laagpakket dat afwisselend uit zandige en kleiige lagen bestaat.

Een kleilaag bevat een zeer grote hoeveelheid water, vaak is meer dan 50% van het volume van klei water. Bij compactie komt er dus een grote hoeveelheid water uit de klei tevoorschijn, het water migreert naar de zandlaag erboven. Als deze zandlaag de enorme hoeveelheid water niet kan verwerken dan zal de zandlaag als drijfzand gaan bewegen.

Zitten er in deze zandlaag ook dunne laminae van klei, dan kan de beweging zich zodanig voltrekken dat het kleilaagje intact blijft doch door het lopende drijfzand op een intensieve wijze wordt verplooid. Er ontstaat dan binnenin een zandlaag, waarvan de laagvlakken keurig recht en evenwijdig blijven, een zeer interessant type van verplooiing in vrij grote, lobvormige, anticlinale plooiën en smalle, puntige synclines.

Prachtige voorbeelden komen voor in de pakketten opgebouwd uit een regelmatige afwisseling van tot enkele decimeters dikke zand- en kleilagen in de Flysch in Zuidwest-Spanje (de Campo de Gibraltar). Uit dit gebied is afb. 13 afkomstig.



Afb. 14. Concreties van verkitten zandsteen: de **boules** of bollen van de Boulonnais.

Concreties

Bij cementatie vindt alleen afzetting plaats van een mineraal, veelal calciet of kwarts, in de poriën tussen de korrels. Er is echter in principe geen enkel beletsel om de chemische reacties verder te laten voortgaan. Zo kan het komen tot uitwisseling van materiaal doordat de oorspronkelijke korrel opgelost wordt; de vrijkomende ruimte kan dan worden ingenomen door het aangevoerde materiaal.

Op deze wijze kunnen concreties ontstaan: aangevoerd materiaal begint zich af te zetten rond een korrel. Als dit mineraal verder gaat uitgroeien zullen de omringende korrels gedeeltelijk of geheel moeten verdwijnen. Zo kunnen de knollen van vuursteen in de Zuidlimburgse kalk ontstaan zijn.

Er zijn vele materialen die concreties kunnen vormen. Naast de vuursteen onder meer ijzerverbindingen - ijzeroxiden, pyriet, sideriet - waardoor klei-ijzersteenconcreties ontstaan, en ook fosfaat: de zwarte fosfaatknollen in de kleien van de Gault van de Boulonnais bijvoorbeeld. Zie afb. 14.

Een concretie zoekt altijd een 'reden' in het sediment om met zijn groei te beginnen. Deze reden is 'iets anders' in het sediment. Dit kan van alles zijn: een zandkorrel in een kalklaag of een fossiel - ieder voorwerpje dat afwijkt van het sediment. Bekend is het voorkomen van sponsnaalden in de vuursteen, ook kunnen er grotere fossielen voorkomen, zoals zeeëgels. Een concretie doorslaan kan dus altijd een verrassing opleveren!

Naamgeving

Een van de belangrijkste criteria bij de naamgeving van sedimenten is de **korrelgrootte**, zoals we in Zand, deel I, al zagen. In Tabel II vinden we vele van de namen die in gebruik zijn.

Tabel II. Naamgeving op korrelgrootte

Afmeting	Onverhard	Verhard	Grieks / Latijn
> 2 mm	grind	conglomeraat, breccie	psephiet / rudiet
2 - 1/16 mm	zand	zandsteen	psammiet / areniet
< 1/16 mm	klei	siltsteen, kleisteen = schalie	peliet / lutiet

De Grieks / Latijnse namen gelden zowel voor onverharde als verharde materie.

Peliet / lutiet omvat silt- en kleifractione.

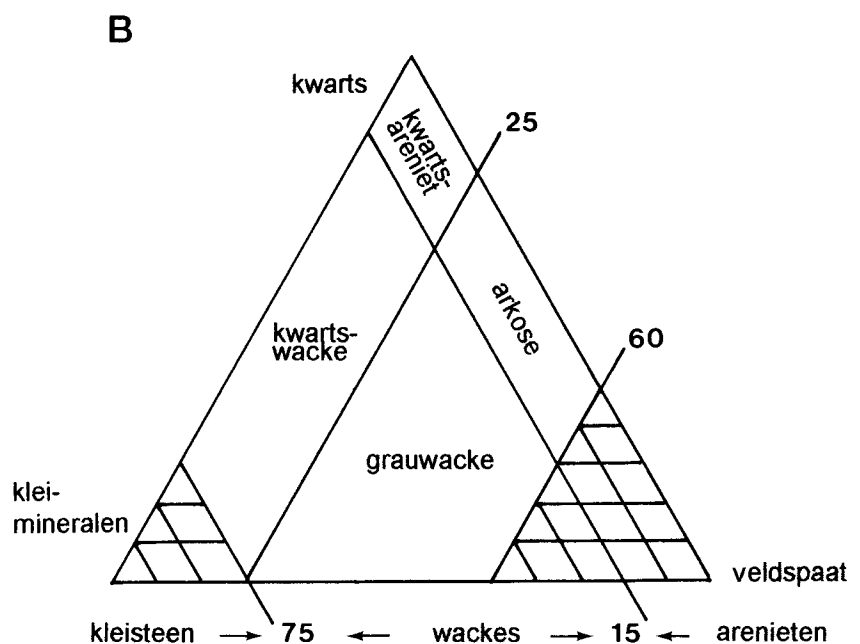
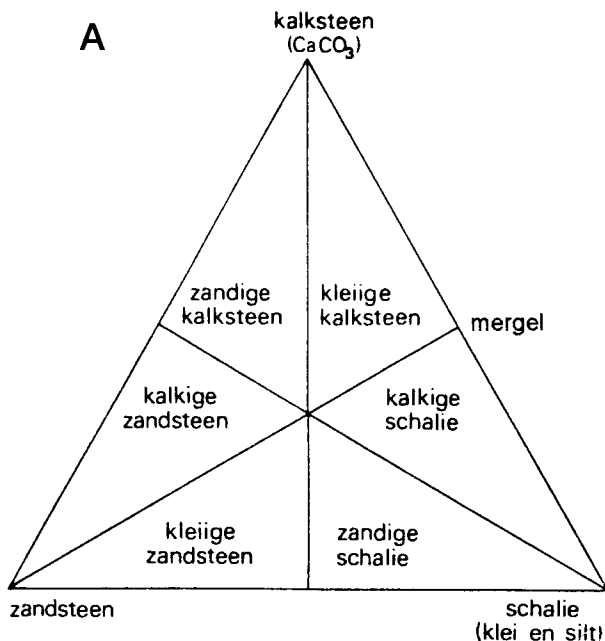
Ook de **samenstelling** is voor de naamgeving belangrijk. Een indeling voor **verhard** (geconsolideerd) materiaal met **kalk**, **zand** en **klei** als componenten levert het diagram A op.

In de praktijk wordt wel gewerkt met een indeling die alleen onderscheid maakt tussen **kwarts**, **veldspaten** en **kleimineralen**, zie diagram B.

Bij geconsolideerde sedimenten zijn de tussenruimten van de korrels veelal opgevuld, bijvoorbeeld door calciet. Hierop is de indeling van Tabel III gebaseerd.

Kwarts- en vuursteenkorrels behoren tot de meest resistente materialen en deze bepalen de graad van *rijpheid* van het sediment. Daarnaast zijn **veldspaatkorrels** van belang voor de naamgeving van, onder meer, de arkose. **Gesteentefragmenten** zijn herkenbare fragmentjes van allerlei gesteenten, van fylliet en schist tot gneis en graniet. Vuursteenfragmentjes worden bij de kwarts gerekend. De **matrix** is zeer fijnkorrelig materiaal dat de ruimte tussen de korrels vult, dit materiaal bestaat veelal uit kleimineralen. **Cement** is materiaal dat is uitgekristalliseerd in de ruimten tussen korrels.

Het zal duidelijk zijn dat in gesteenten waar de poriën gevuld zijn met matrix er weinig of geen gelegenheid was om tussenruimten in een later stadium, als het sediment reeds was gevormd, op te vullen met een ander mineraal. De vorming van cement is vaak een proces dat ver na het moment van sedimentatie plaats vindt.



Tabel III. Indeling van de zandige gesteenten

cement of matrix	> 15% matrix, geen cement	< 15% matrix, tussenruimten leeg of gevuld met cement		
meer veldspaat dan gesteentefragm.	veldspaat-houdende grauwacke	arkose	subarkose of veldsp.houdende zandsteen	< 5% vuursteen ortho-zandsteen
meer gest. fragm. dan veldspaat	lithische grauwacke	lithische zandsteen subgrauwacke protozandsteen		> 5% vuursteen
kwartsgehalte	minder dan 75%		tussen 75 en 95%	> 95%

Mineralogie en Chemie: *silicaten in formules gevangen*

door D.J. Liefink *)

Bij het openslaan van een boek over mineralen vinden we vaak naast de naam en de beschrijving van de mineralen een ingewikkelde scheikundige formule die de samenstelling van het mineraal weergeeft. Voor sommige mineralen is die schijnbaar zeer eenvoudig (b.v. sfaleriet: ZnS, galeniet: PbS), maar soms staat er een lange rij symbolen met allerlei getallen ertussen (b.v. toermalijn, hoornblend).

In dit verhaal wil ik enige uitleg geven over de informatie die zo'n formule ons geeft. Ook zal blijken dat in de verschillende formules wel degelijk een systeem zit. Voor een goed begrip van deze formules is een stukje scheikundige en natuurkundige kennis nodig van atomen en kristalstructuren die ik zo eenvoudig mogelijk zal behandelen. Ik zal daarnaast veel aandacht schenken aan de silicaten, omdat dit de meest voorkomende groep mineralen op aarde is.

Onze bouwstenen: atomen, protonen, neutronen en elektronen

Om het begrip van de scheikunde van de mineralen op te bouwen, gaan we eerst de mineralen ontleden in de kleinste elementaire deeltjes. Vervolgens gaan we die deeltjes weer samenvoegen om weer mineralen te maken.

Ieder mineraal bestaat uit een opstapeling van kleine deeltjes die we atomen noemen. Deze atomen kunnen we ons voorstellen als bolletjes. Er komen in de natuur ongeveer 90 verschillende soorten atomen voor, bijvoorbeeld zuurstof, aluminium en goud. Het verschil tussen deze atomen zit in de bouwstenen van die atomen. Iedere soort atoom is opgebouwd uit drie bouwstenen: protonen, neutronen en elektronen.

Deze drie bouwstenen hebben verschillende natuurkundige eigenschappen. Protonen en neutronen zijn even zwaar, we zullen het gewicht van deze bouwstenen op 1 stellen. Ten opzichte van protonen en neutronen weegt een elektron niets, dus stellen we dit gewicht op 0. (In de praktijk hebben alle drie de bouwstenen een massa die uit te drukken is in grammen, maar het gaat hier om de verhoudingen van de gewichten.) Zowel protonen als elektronen hebben een elektrische lading.

Protonen hebben een lading die we aangeven met + (plus) en elektronen hebben een - (min)lading. Neutronen hebben geen lading, ofwel ze zijn neutraal. Nu is het van belang aan te nemen dat positieve ladingen negatieve ladingen aantrekken en andere positieve ladingen afstoten. Dus protonen trekken elektronen aan en stoten andere protonen af. Evenzo stoten elektronen elkaar af en trekken ze protonen aan.

Nu we de bouwstenen kennen, kunnen we atomen gaan maken. Van te voren stellen we de voorwaarde, dat atomen opgebouwd zijn uit alleen de drie bovengenoemde bouwstenen. Ook stellen we dat de lading van atomen 0 is, dus in een atoom zitten evenveel protonen (+) als elektronen (-). Uit lang natuurkundig onderzoek is gebleken, dat protonen en neutronen samenklonteren tot een geheel dat we de atoomkern noemen. Rond deze kern draaien elektronen. Het onderscheid in de verschillende atomen is het aantal protonen en neutronen in de kern (en dus het aantal elektronen dat eromheen cirkelt).

Wanneer we atomen gaan bouwen, beginnen we simpel: de atoomkern bestaat uit één proton, daaromheen cirkelt één elektron. Ziedaar het eerste atoom: waterstof (afb. 1). Het elektron wordt aangetrokken door de kern, maar botst er niet tegenaan vanwege nog andere natuurkundige verschijnselen, die ik niet behandel.

We bouwen verder aan atomen door kernen te maken met meer protonen en dus meer elektronen die eromheen draaien. We moeten ervoor zorgen dat het aantal protonen in de kern even groot is als het aantal neutronen. Omdat protonen elkaar afstoten vanwege de positieve lading, moeten neutronen ervoor zorgen dat de kern niet uit elkaar valt.

Na het waterstof komt een kern met twee protonen en twee neutronen, waaromheen twee elektronen draaien. Dit is het volgende element: helium (afb. 2). Vervolgens krijgen we drie protonen, drie neutronen en drie elektronen: lithium. Bij een bepaald aantal protonen in de kern willen deze elkaar zo graag afstoten, dat er meer neutronen nodig zijn dan één per proton. Het element uranium bevat bijvoorbeeld 92 protonen en ongeveer 146 neutronen.

*) Drs. Dick J. Liefink is afgestudeerd geoloog en is als A.I.O. verbonden aan de vakgroep Anorganische Chemie van de Universiteit Utrecht.