

## Sedimentaire gesteenten

Sedimenten zijn de getransporteerde producten van mechanische, chemische of biologische verwerking van gesteenten. Onder de term verwerking verstaan we de chemische en fysische veranderingen van gesteenten die blootstaan aan atmosferische invloeden aan het aardoppervlakte. Sedimentaire gesteenten zijn gelithificeerde sedimenten, dat wil zeggen, sedimenten die "versteend" zijn. Deze versteening gebeurt door diagenetische processen: processen die plaatsvinden nadat de sedimenten zijn afgezet.

Sedimenten en sedimentaire gesteenten vormen slechts 7% van het volume van de aardkorst, maar ze beslaan wel 75% van het aardoppervlak. Het belang van sedimentaire afzettingen ligt in het feit dat ze aan het aardoppervlakte zijn gevormd, en dat ze daarmee dus een beeld geven van de condities die heersten in deze omgeving, miljoenen tot miljarden jaren geleden. Het zijn ook de gesteenten die fossielen bevatten, en dus informatie geven over hun levensomstandigheden.

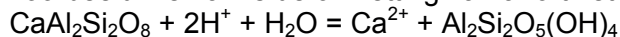
### Belangrijkste soorten sedimenten

De sedimenten en sedimentaire gesteenten kunnen in drie grote groepen verdeeld worden. De grootste groep is de van de **siliciclastische** of **detritische** sedimenten. De naam van dit sediment is afgeleid van het Griekse woord "klastein" (κλασσειν), dat "breken" betekent (vgl. *pyroclastische* gesteenten). De fragmenten waaruit dit sediment bestaat zijn dominant silicaatmaterialen en zijn gevormd door de verwerking van gesteenten, vervolgens getransporteerd door wind, water of ijs, en tenslotte afgezet in lagen aan het aardoppervlak. Meer dan 80% van de sedimentaire gesteenten bestaat uit siliciclastische sedimenten. De tweede groep is die van de **chemische** sedimenten. De deeltjes waaruit dit sediment bestaat zijn direct uit water neergeslagen. Dit is een relatief kleine groep van sedimenten, waartoe bijvoorbeeld gips of haliet-afzettingen behoren, en een selecte groep van kalkstenen. De derde groep bestaat uit de **biochemische** sedimenten, die, op directe of indirecte wijze, gevormd zijn door biologische activiteit. Het grootste gedeelte van kalkstenen behoren tot deze groep sedimenten, en ook de meeste cherts (= vuursteen). Hieronder vallen ook de bioclastische sedimenten, die gevormd zijn door het opbreken, transport en afzetten van skeletmateriaal.

### Verwerking

De eerste stap in het ontstaan van sedimenten is verwerking, want dit proces zorgt voor de fragmenten die de siliciclastische sedimenten zullen vormen, maar ook voor de opgeloste ionen die direct uit water neerslaan voor de chemische sedimenten, of gebruikt worden door organismen om hun skeletjes te vormen die later de biochemische sedimenten zullen vormen.

Ook in verwerking kunnen we weer drie processen onderscheiden: fysische, chemisch en biochemische verwerking. Een voorbeeld van fysische verwerking is het uiteenvallen van gesteenten doordat water in spleten indringt, daar beviert (en daardoor uitzet), zodat het gesteente langs deze zone opbreekt. Door wind en water kunnen gesteenten ook op puur fysische wijze afgesleten worden, maar dit proces is niet zo effectief indien het niet geholpen wordt door chemische verwerking. Hierbij worden mineralen omgezet en/of opgelost. Een voorbeeld hiervan is de omzetting van anorthiet (plagioklaas) in een zuur milieu:



Hierbij wordt kaolinite gevormd, een zeer zacht kleimineraal (les 3), en calcium-ionen in oplossing. De calcium-ionen kunnen later weer neerslaan tot gips, of gebruikt worden door organismen om calciëte skeletjes te bouwen. Een soortgelijke reactie kan ook uitgeschreven worden voor alkaliveldspaat. Een graniëte waarvan de plagioklaas en alkaliveldspaat omgezet zijn tot kaolinite, zal sneller uit elkaar vallen onder de invloed van fysische processen, dan een graniëte waarvan deze mineralen nog niet zijn omgezet.

Biologische processen kunnen ook een handje helpen bij de chemische verwerking: plantenwortels kunnen gesteenten opbreken en planten produceren  $\text{CO}_2$ , een zuur dat verwerking bevordert. Het effect is dat verwerking in warme gebieden veel sneller gaat dan aan de pool: hogere temperaturen versnellen chemische processen, en er is beduidend

meer biologische activiteit in de tropen dan op de zuidpool.

Mineralen die erg makkelijk verwerken zal je niet zo vaak in sedimenten terugvinden, terwijl zeer resistente mineralen relatief aangerijkt worden. Dit is natuurlijk van belang als je aan de hand van de mineraalinhoud van siliciclastische gesteenten wilt achterhalen waar ze vandaan kwamen: niet alle mineralen zullen proportioneel tot hun concentratie in het brongesteente ook in het sediment voorkomen. Welke factoren bepalen hoe snel materiaal verweert?

1. Soort mineraal. Mineralen met covalente bindingen zijn resistenter tegen verwerking dan mineralen met ionische verbindingen. Hierbij kun je keuzenzout (zuiver ionische verbinding) vergelijken met plagioklaas, dat grotendeels covalente bindingen heeft. Daarnaast zijn Al-O en Si-O bindingen zijn stabielere dan verbindingen met alkali's of metalen. Dit hebben we al eerder gezien bij magmatische petrologie, waarbij de verbindingen met Al en Si tijdens smelten niet verbroken werden, en die met de alkali's en metalen wel. Dit heeft tot effect dat mineralen die typisch zijn voor mafische magmatische gesteenten sneller verwerken dan mineralen uit een graniet of rhyoliet (Fig. 8.1).

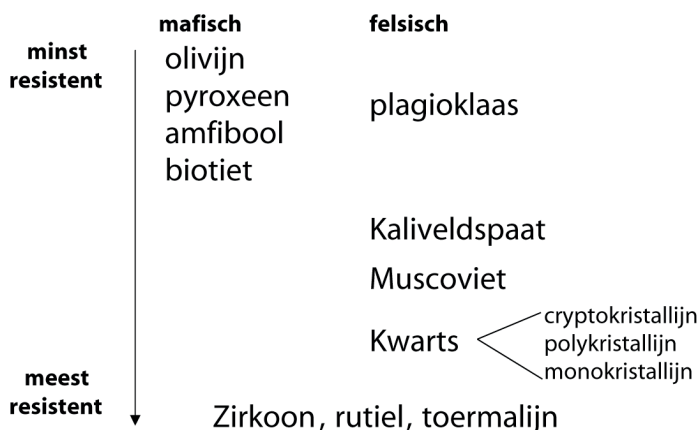
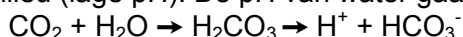


Fig. 8.1: Relatieve resistentie van verschillende mineralen tegen verwerking.

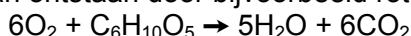
2. Kristalliniteit. Mineralen met een perfect kristalrooster zijn veel resistenter tegen verwerking dan mineralen waarvan het rooster defecten bevat, of bijmenging van andere elementen. Dus pure K-veldspaat is stabielere dan K-veldspaat waarin Na is bijgemengd. Opaal (amorf silica) is veel minder stabiel dan kwarts.

3. Integriteit Splijting, breuken, tweelingen en fasegrenzen dragen allemaal bij aan de verzwakking van een mineraal. Dit komt doordat chemische verwerking altijd via het oppervlak van een mineraal plaatsvindt. Kleinere korrels verwerken sneller dan grote omdat ze een relatief groter oppervlak hebben.

4. Chemisch milieu/klimaat. De meeste silicaten zijn stabielere in een basisch dan in een zuur milieu. Alle reacties, dus ook verwerking, gaan sneller bij hogere dan bij lagere temperatuur. Organische moleculen kunnen verbindingen aangaan met elementen en zo hun oplosbaarheid verhogen. De mafische mineralen en veldspaten verwerken het beste in een zuur milieu (lage pH). De pH van water gaat omlaag door reactie met CO<sub>2</sub>:

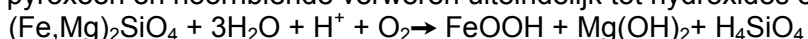


CO<sub>2</sub> kan ontstaan door bijvoorbeeld rotting van plantenmateriaal:



In het algemeen is rivier- en grondwater in vochtige, warme gebieden zuur, en in drogere gebieden neutraal tot basisch; zeewater is basisch (pH 8)

Olivijn, pyroxeen en hoornblende verwerken uiteindelijk tot hydroxides en silicazuur:



Biotiet en muscoviet verwerken tot kleimineralen (illiet, vermiculiet); de veldspaten (plagioklaas en kaliveldspaat) verwerken tot kaoliniet of gibbsiet (AlOOH) en silicazuur.

Kwarts kan uiteindelijk ook oplossen tot silicazuur, vooral in een basische omgeving, maar

doet dit zelden:



Als vertering dus "voltooid" is, blijft er niets anders over dan wat hydroxides, silicazuur en ionen in oplossing. Gelukkig gaat het proces dus niet zo ver door, anders zou er niet zo veel materiaal overblijven om siliciclastische gesteenten van te maken.

### Transport en korrelgrootte klastische sedimenten

De meeste sedimenten worden getransporteerd vanaf hun **brongebied** (=het gebied waar de klasten door vertering uit hun vroegere gesteente zijn losgemaakt), door middel van verschillende media, zoals de zwaartekracht, ijs (gletscher), water (rivier, zee, meer) of wind. Hiervan is water het meest voorkomende transportmedium. De energie van het transport medium bepaalt korrelgrootte van het vervoerde sediment. Het sediment wordt afgezet wanneer de energie van het transportmedium afneemt. De processen van vertering en transport zijn het meest effectief op hoger gelegen delen van de aarde, zoals gebergtekanten, terwijl afzetting juist plaatsvindt in lager gelegen gebieden.

De siliciclastische sedimenten worden dan ook ingedeeld op basis van de diameter van de korrels in het sediment (fig. 8.2). Wanneer er een grote variatie is aan korreldiameters (slechte sortering, zie hieronder), kijkt men naar de grotere korrels, aangezien die vertellen hoe energetisch het transportmedium moet zijn geweest die het materiaal heeft vervoerd.

| Sediment Grootte (mm) | $\phi$ -schaal (-log <sub>2</sub> ) | Engelse naam | Nederlandse naam | Gesteente naam (Rock Name)                                          |
|-----------------------|-------------------------------------|--------------|------------------|---------------------------------------------------------------------|
| >256                  | < -8                                | Boulder      | Grint (Gravel)   | Rudiet (Rudite)<br>Conglomeraat (Conglomerate)<br>Breccie (Breccia) |
| 64-256                | -6 tot -8                           | Cobble       |                  |                                                                     |
| 4-64                  | -2 tot -6                           | Pebble       |                  |                                                                     |
| 2-4                   | -1 tot -2                           | Granule      |                  |                                                                     |
| 0.063-2               | 4 tot -1                            | Sand         | Zand             | Zandsteen (Sandstone)                                               |
| 0.004-0.063           | 8 tot 4                             | Silt         | Silt             | Siltsteen (Siltstone)                                               |
| <0.004                | >8                                  | Clay         | Klei             | Kleistein/Schalie (Mudstone/Shale)                                  |

Fig. 8.2: Benaming van sedimentaire gesteenten op basis van de dominante korreldiameter.

In de sedimentologie wordt de korrelgrootte vaak gegeven als de negatieve logaritme met basis 2 van de diameter. Dit is de zogenaamde phi-schaal. Het Engels heeft een wat uitgebreidere terminologie om grovere korrels te beschrijven, en deze termen zijn ook gegeven in figuur 8.2.

De algemene naam voor materiaal met zeer grote klasten is rudiet (of ook wel psefiet), maar meestal wordt een onderverdeling gemaakt in materiaal met goed afgeronde klasten (**conglomeraat**) of met hoekige klasten (**breccie**). Breccie en conglomeraat bestaan nooit uit enkel zeer grove klasten; ook al is de dominante korrelgrootte meerdere centimeters, dan nog zal je fijner materiaal tussen deze grotere klasten vinden. Dit fijnere materiaal noemen we de **matrix** (enigzins vergelijkbaar met de matrix of "grondmassa" in extrusieve magmatische gesteenten). Indien de fragmenten in het gesteente op elkaar steunen, hebben we het over een **klast-ondersteunde** breccie of conglomeraat; als de klasten in de matrix "drijven", dan is het een **matrix-ondersteunde** rudiet. Tenslotte kan je nog kijken naar de samenstelling van de grotere klasten: indien die allemaal uit hetzelfde materiaal bestaan is het een **monomict** rudiet, en als er veel verschillende soorten klasten aanwezig zijn, een **polymict** conglomeraat/breccie. Met weinig verschillende klasten noemen we het oligomict.

In het geval van rudieten, zullen de klasten meestal herkenbare stukken gesteente zijn (b.v. graniet of andere sedimentaire gesteenten zoals siltsteen, zandsteen). Bij fijnkorreligere sedimentaire gesteenten, zoals de **zandstenen** (ook wel arenieten of psammieten genoemd) kunnen de korrels bestaan uit gesteentefragmenten, of uit individuele mineraalkorrels. Onder de verschillende mineralen die in een sediment aanwezig kunnen zijn, zijn kwarts en veldspaat (alkaliveldspaat en in mindere mate plagioklaas) bijna altijd dominant. De naamgeving van zandstenen geschiedt dan ook op de basis van de relatieve hoeveelheden kwarts, veldspaat en gesteentefragmenten (Fig. 8.3). **Kwartsarenieten** (of kwartszandstenen) bestaan voor meer dan 95% uit kwartsfragmenten, terwijl **arkoses** ook een belangrijk percentage (>25%) aan veldspaten bevatten. Er is bij zandstenen ook tot 15% matrix toegestaan; indien er meer fijnkorrelig materiaal aanwezig is, spreken we over een wacke. Hiervan beslaan de **grauwackes** het grootste deel van het desbetreffende diagram. Vanaf meer dan 75% matrix hebben we een kleisteen of schalie. Het verschil tussen een kleisteen en een schalie is de splijting: indien het gesteente geheel massief is, is het een kleisteen; indien het in dunne laagjes uit elkaar valt, wordt het een schalie genoemd. In het Vlaams wordt in plaats van "schalie" vaak het woord "schiefer" gebruikt.

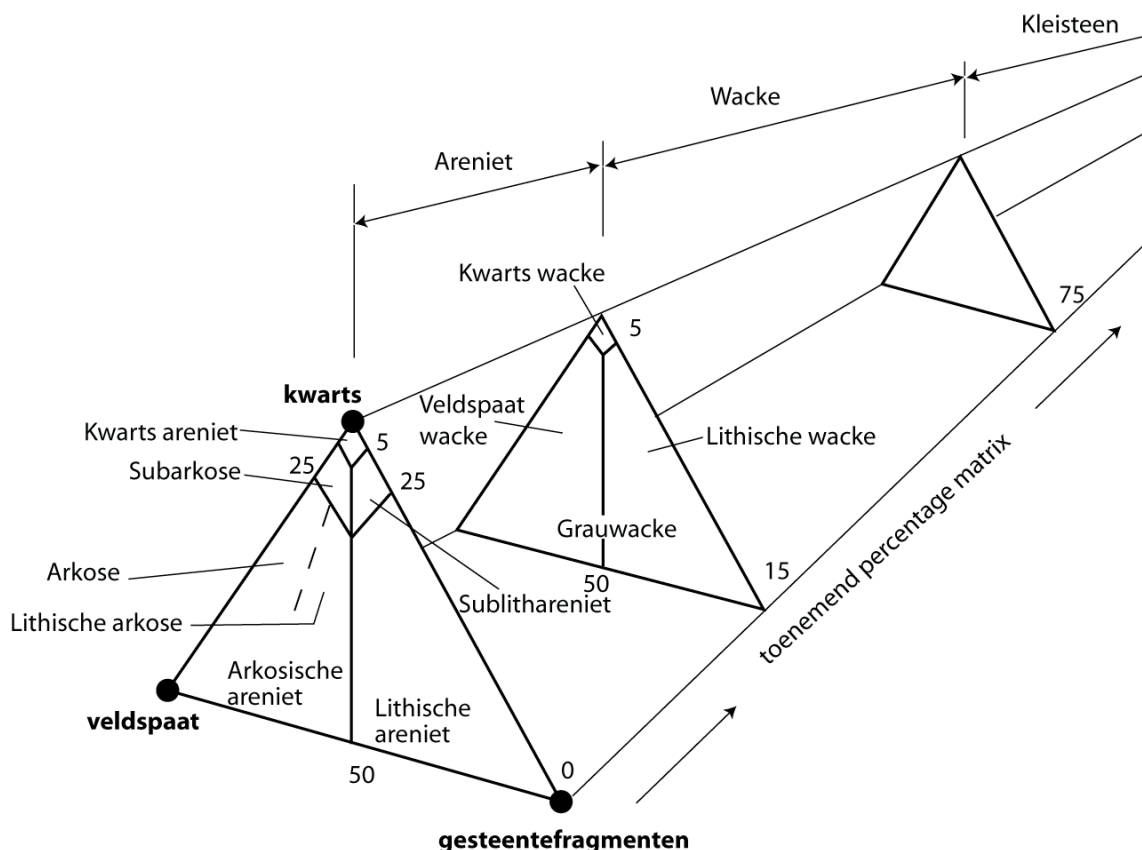
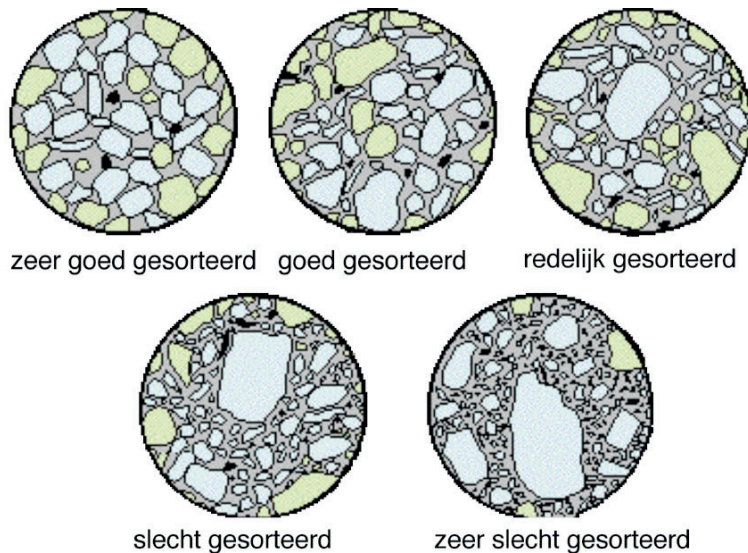


Fig. 8.3: Indeling van de klastische sedimenten. Het woord "areniet" kan ook door "zandsteen" vervangen worden.

In essentie is het verschil tussen een zandsteen en een wackesteen de mate van sortering. De **sortering** vertelt ons wat de variabiliteit is in de korrelgrootte van het sediment.

| Sorterings klasse      | Standaard Deviatie |
|------------------------|--------------------|
| Zeer goed gesorteerd   | <0.35              |
| Goed gesorteerd        | 0.35-0.5           |
| Matig goed gesorteerd  | 0.5-0.71           |
| Matig gesorteerd       | 0.71-1.0           |
| Slecht gesorteerd      | 1.0-2.0            |
| Zeer slecht gesorteerd | >2.0               |

Mathematisch gezien is het de relatieve standaarddeviatie van de gemiddelde korrelgrootte van het sediment. Een areniet is dus beter gesorteerd dan een wackesteen. Bovenstaande tabel geeft de relatie tussen de (mathematische) standaarddeviatie en de benaming die we aan het sediment geven. Omdat je de gemiddelde korrelgrootte en de standaarddeviatie enkel nauwkeurig kunt bepalen door het sediment te zeven en de verschillende zeeffracties te wegen, kunnen we dit enkel goed bepalen in ongeconsolideerde sedimenten (die dus nog niet gelithificeerd zijn). Voor gesteenten maakt men meestal een visuele schatting van de sortering. Figuur 8.4 geeft een visuele indruk van goed en slecht gesorteerde sedimenten.



*Figuur 8.4: Sortering van sedimenten en sedimentaire gesteenten (in 2D).*

Indien een sediment zich nog dicht bij zijn brongebied bevindt, zal het over het algemeen slecht gesorteerd zijn. Naarmate het verder weg getransporteerd is, neemt de sortering toe. Niet alleen de sortering wordt beter, maar ook de vorm van de korrels verandert: deze worden in toenemende mate afgerond (in tegenstelling tot hoekig), en meestal ook bolvormiger (in tegenstelling tot prismatisch, plaatvormig of naaldvormig; in het geval van mineraalkorrels zal dit echter ook afhangen van de soort mineraal: mica's zullen bijvoorbeeld altijd plaatvormig blijven). Een gesteente dat een lange weg van zijn brongebied heeft afgelegd, word "**rijp**" of "**matuur**" genoemd. Figuur 8.5 geeft een flow-chart om te bepalen wat de maturiteit of rijpheid van een gesteente is.

Naarmate het sediment textuurele maturiteit bereikt (d.w.z. goede sortering, afronding), zal ook de mineralogische maturiteit toenemen: labiele mineralen verdwijnen, en resistente mineralen nemen daardoor percentueel toe. Een zeer goed gesorteerde zandsteen met mooie bolvormige korrels zal daardoor voor het grootste gedeelte uit kwarts, en misschien nog wat zware mineralen (zirkoon, toermalijn, rutiel) bestaan. Een wackesteen bevat daarentegen vaak nog een significante hoeveelheid plagioklaas en alkaliveldspaat.

De korrelvorm en mineraalinhoud zijn dus goede hulpmiddelen om siliciclastische sedimentaire gesteenten te onderscheiden van magmatische (of metamorfe) gesteenten. In magmatische gesteenten zijn de kristallen vaker euhedrisch (magma'sche gesteenten) of subhedrisch (intrusieve gesteenten). Bij sedimentaire gesteenten, zeker mature sedimentaire gesteenten, is de vorm van de korrels (die vaak uit één mineraal bestaan) eerder afgerond. Kwarts is het dominante mineraal in siliciclastische gesteenten, en slechts zelden in magmatische gesteenten. Daarnaast kunnen siliciclastische gesteenten ook sedimentaire structuren vertonen, zoals (scheve) gelaagdheid of golfribbels (zie onder), structuren die zeer zelden voorkomen in magmatische gesteenten, en helemaal nooit in metamorfe gesteenten.



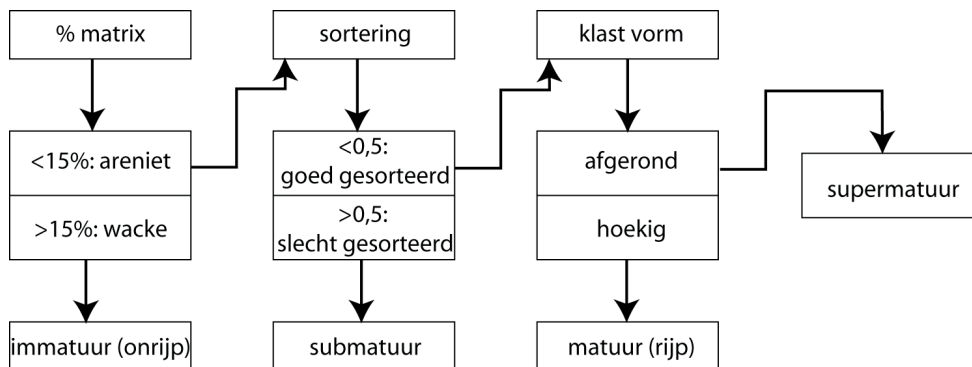


Fig. 8.5:  
Bepaling  
van de  
maturiteit  
van een  
sediment

### Diagenese / lithificatie

Diagenese of lithificatie is een verzamelnaam voor de processen die van een sediment een sedimentair gesteente maken. Deze processen beginnen direct na de afzetting van het sediment, en gaan geleidelijk over in metamorfe processen (de enigszins arbitraire grens wordt bij 150-200°C gelegd). Belangrijke diagenetische processen zijn compactie, drukoplossing, rekristallisatie, vervanging en cementatie (fig. 8.6).

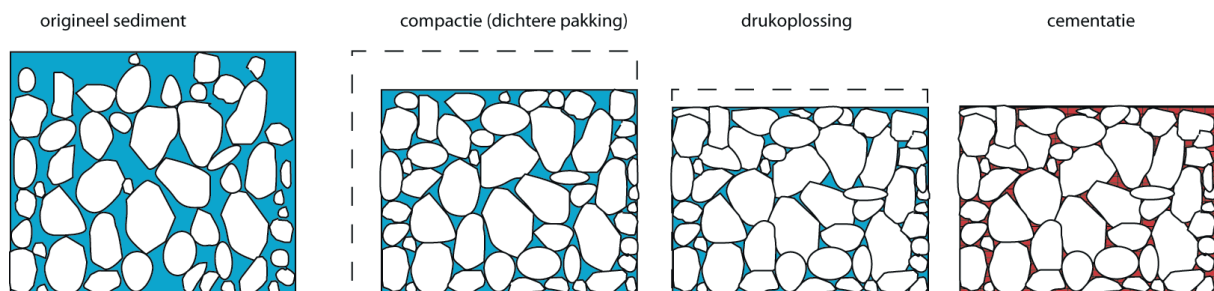


Fig. 8.6: Diagenetische processen, oftewel lithificatie van een sediment. De blauwe kleur in de eerste drie plaatjes stelt water (of eventueel lucht) voor; het rode materiaal in het laatste beeld is cement, materiaal (meestal kwarts of calciet) dat uit vloeistoffen is neergeslagen en de korrels aan elkaar kit.

Compactie is het verlies van poriënruimte in een gesteente. Dit komt doordat de korrels efficiënter gestapeld worden of door het verlies van water uit de matrix. Wanneer korrels hard op elkaar gedruwd worden zullen ze op hun contactpunten oplossen; dit opgeloste materiaal slaat vaak aan de zijkant van de korrels weer neer. Hierdoor verandert de korrelvorm, en gaat er ook weer lege ruimte verloren. De overgebleven poriënruimte kan tenslotte nog opgevuld worden door materiaal dat neerslaat uit oplossingen die door het sediment percoleren. Deze latere opvulling wordt "**cement**" genoemd, moet niet verward worden met de fijnkorrelige **matrix** die tegelijkertijd met het sediment wordt afgezet. Over het algemeen is matrix fijnkorreliger dan cement, en heeft het een dof uiterlijk. Cement is kristallijn, en heeft een helderder uiterlijk. Het kan in handstuk echter moeilijk zijn de twee uit elkaar te houden. Vaak bestaat dit cement uit kwarts of calciet, maar in sommige gevallen kan het ook ijzeroxide (hematiet) neerslaan. Dit geeft een rode kleur aan het sediment, die karakteristiek is voor afzettingen die onder oxiderende omstandigheden zijn gevormd, meestal als fluviatiele (rivier-) of eolische (wind-) afzettingen op het continent. Een groen-zwarte kleur van sedimenten wijst juist op afzetting onder reducerende omstandigheden. Rekristallisatie en vervanging zijn diagenetische processen die vooral bij carbonaat-gesteenten van belang zijn, en zullen we daar tegenkomen.

### Sedimentaire structuren

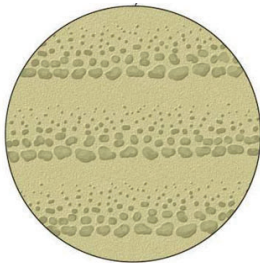
Siliciclastische sedimenten en sedimentaire gesteenten kunnen structuren vertonen die je in andere gesteentetypes niet vindt, en die je iets vertellen over de wijze waarop de sedimenten

zijn afgezet.

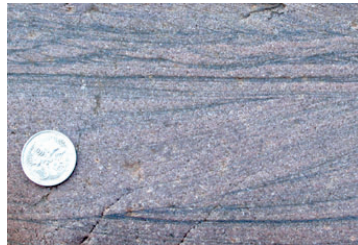
Sedimenten worden meestal in horizontale lagen afgezet (waarover in les 9 meer), en dit leidt er toe dat de meeste siliciclastische sedimentaire gesteenten een waarneembare **gelaagdheid** vertonen. Binnen één laag kan de korrelgrootte van het sediment veranderen, en dan spreken we over **gegradeerde gelaagdheid** (fig. 8.7a). Meestal is de onderkant van de laag grofkorreliger dan de bovenkant ("fining upwards" in het Engels).

Eén laag kan soms ook bestaan uit dunnere laagjes, die een hoek maken met de onder- en bovenkant van de laag waar ze inzitten (fig. 8.7b). Dit wordt **scheve gelaagdheid** genoemd. Scheve gelaagdheid ontstaat doordat sediment zich bij transport in snelstromend water en wind als een migrerende duin voortbeweegt, waarbij de korrels op de stroomafwaartse zijde van de duin tot stilstand komen (Fig. 8.7c). Dit leidt ook tot het ontstaan van **stroomribbels** door het reliëf dat de duinen aan het oppervlak vormen. Deze ribbels zijn asymmetrisch indien ze door stroming worden gevormd, maar symmetrisch wanneer ze door golfbeweging (aan het strand) zijn ontstaan; dan worden ze **golfribbels** genoemd.

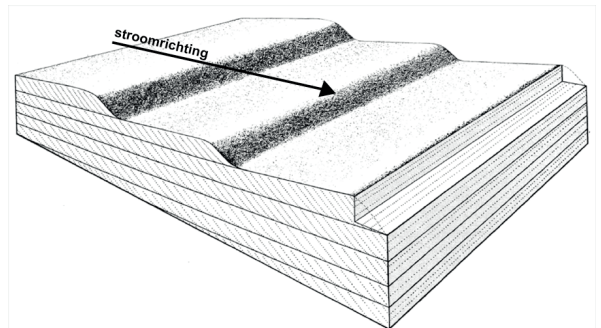
Tenslotte kunnen er in sedimenten ook nog "**mudcracks**" ontstaan wanneer het sediment uitdroogt, en er hierdoor krimp-scheuren in het sediment ontstaan (enigszins vergelijkbaar met de vorming van basaltzuiltjes in afkoelende lava).



*Fig. 8.7a:  
Gegradeerde  
gelaagdheid, waarbij  
de korrelgrootte  
binnen één laag  
varieert.*



*Fig. 8.7b: Scheve  
gelaagdheid, waarbij één  
horizontale laag  
opgebouwd is uit een set  
van scheve lagen.*

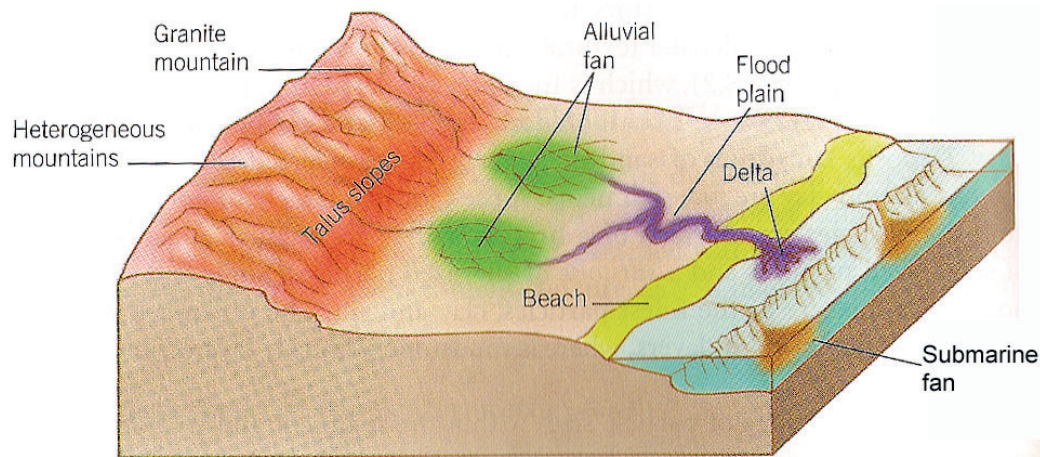


*Fig. 8.7c: Ontstaan van scheve gelaagdheid  
en stroomribbels door afzetting in stromend  
water, of als duinen (wind transport).*

### Siliciclastische sedimenten in hun tektonische omgeving

De vier belangrijkste gesteenten met zandgrootte korrels zijn de kwartzandstenen, arkoses, lithische zandstenen en grauwackes. Deze komen in verschillende milieus voor (Fig. 8.8).

Het brongebied van een sediment bevindt zich gewoonlijk in een omgeving met positief reliëf, zoals een gebergteketen. Zeer dicht bij de bron vinden we enkel zeer grofkorrelige sedimenten, zoals breccies en conglomeraten, waarvan het transport heeft plaatsgevonden door zwaartekracht, gletschers of hoog-energetische bergbeken. Aan de voet van de bergen vinden we dan mineralogisch onrijpe sedimenten, met name arkoses en lithische arenieten. Indien het brongebied van het sediment uit granieten bestaat, zullen de sedimenten eerder arkoses zijn, terwijl een brongebied van (gemetamorfoseerde) sedimentaire gesteenten eerder lithische arenieten zal vormen. De afzetting van deze sedimenten gebeurt typisch in rivieren. Door de stroming van het water ontstaan er stroomribbels en scheve gelaagdheid in het sediment (Fig. 8.7c). Dit komt veel voor in fluviatiele afzettingen, maar ook in eolische sedimenten, zoals duin- en woestijnafzettingen. De sedimenten in eolische afzettingen zijn vaak textureel en mineralogisch rijp, en dus kwartzandstenen. Deze vinden we ook aan het strand, waar daar door de voortdurende golfwerking het sediment ontdaan wordt van zijn labiele elementen. Strandafzettingen worden gekenmerkt door golfribbels. Aan een passieve continentrand zullen kwartzandstenen ook als ondiep mariene afzettingen voorkomen.



| kleurcode                                                                           | texturele kenmerken                                                                           | sedimenten                                |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------|
|    | Afzetting dicht bij brongebied; sedimenten slecht gesorteerd en hoekig                        | Breccie, conglomeraat, arkose             |
|    | Enigzins gesorteerd en afgerond; grotere fragmenten, gemengd met klei en silt                 | Conglomeraat, arkose, lithische zandsteen |
|    | Sortering, afgerondheid, bolvormigheid beter, scheiding klei en silt van grovere bestanddelen | Lithische zandsteen                       |
|    | Goed gesorteerd en afgerond; geen klei en silt                                                | Kwartzandsteen                            |
|  | Gesteentefragmenten van diverse grootte gemengd met klei en silt in turbidietstroom           | Grauwacke                                 |

Fig. 8.8: Afzettingsgebieden en hun siliciclastische sedimenten.

Grauwackes worden meestal afgezet in zogenaamde "turbidietstromen", stromen van relatief slecht gesorteerd materiaal die van de continentale helling naar beneden komen zetten. Deze bestaan in het geïdealiseerde geval uit vijf verschillende "units" van grovere materialen onderop en fijnere sedimenten aan de top, die tezamen een pakket vormen dat naar de ontdekker de "Bouma sequentie" wordt genoemd. De grauwackes worden in de onderste drie units gevonden. Deze afzettingen komen vooral veel voor aan actieve continentranden, waar veel seismische activiteit is, waardoor deze turbidietstromen opgewekt kunnen worden.

### Carbonaten (vnl. biochemische sedimenten)

Na de siliciclastische gesteenten vormen de carbonaten de grootste groep van sedimentaire gesteenten. Mineralogisch zijn dit voor het overgrote deel calciet- en dolomietgesteenten. Carbonaten komen door een groot deel van de geologische geschiedenis voor. Sinds het ontstaan van meercellige organismen worden ze vooral in biogene afzetting als carbonaat-skeletten van invertebraten gevonden; vóór die tijd waren carbonaten vooral geassocieerd met matten van cyanobacteria (= stromatolieten; vroeger ook wel algenmatten genoemd). Carbonaten worden vooral in warme gebieden gevormd, want de organismes die carbonaat-skeletten vormen voelen zich het beste in de warmte; daarnaast neemt de oplosbaarheid van calciumcarbonaat in water af bij toenemende temperatuur. Dit laatste is opmerkelijk, want de oplosbaarheid van de meeste stoffen neemt juist toe met stijgende temperatuur. Verder worden carbonaten binnen deze klimatologische zone vooral gevormd in ondiepe zeeën met een normale saliniteit, waar niet al te veel siliciclastische sedimentatie plaatsvindt (fig. 8.9). Natuurlijk worden carbonaten niet alleen (maar wel voornamelijk) in een marien milieu afgezet: travertijn, het materiaal dat wordt afgezet bij warme bronnen of in grotten, is eveneens calciumcarbonaat.



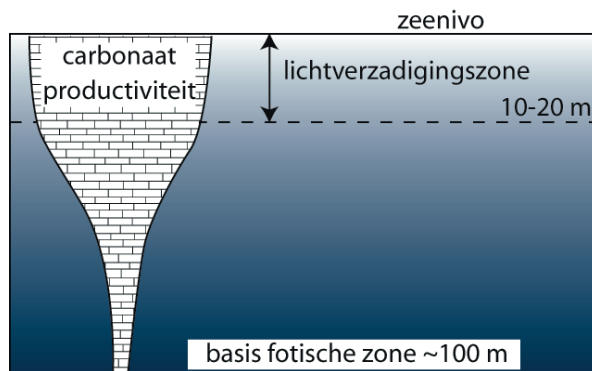


Fig. 8.9: Carbonaatproductiviteit neemt af met de diepte, omdat de carbonaatvormende organismes licht nodig hebben om te leven.

Carbonaat in de open oceaan wordt voornamelijk geproduceerd door planktonische (zwemmende) organismen in de fotische zone (= bovenste zone in een watermassa, waar voldoende zonlicht doordringt voor fotosynthese), waarvan de skeletjes na het sterven door de waterkolom naar beneden toe regenen, en op de zeebodem afzettingen van "calcareous ooze" (kalkmodder) vormen. Na diagenese vormen deze kalkstenen. Carbonaten worden maar tot een bepaalde diepte in de oceanen afgezet (Fig. 8.10).

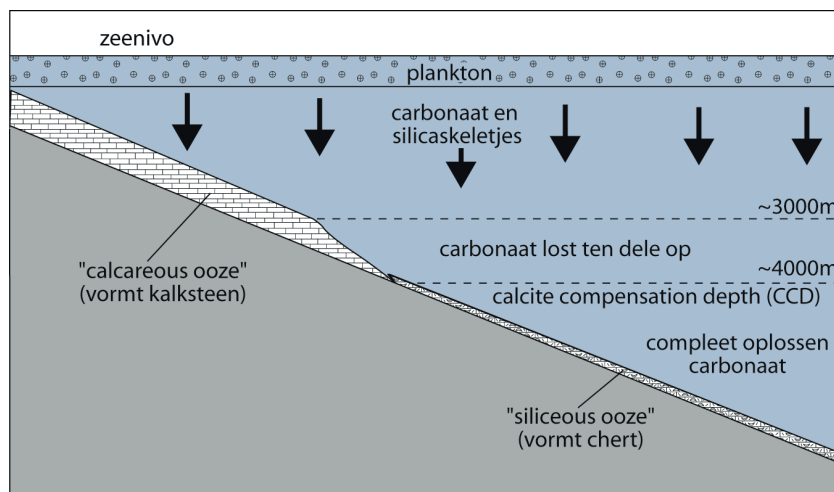


Fig. 8.10: Concept van "carbonate compensation depth", waaronder geen carbonaat meer wordt afgezet.

Vanaf 3000 meter diepte beginnen de carbonaatskeletjes op te lossen, omdat het water daar onderverzadigd is aan carbonaat door de hogere druk en lagere temperatuur. Beneden de zogeheten "**Carbonate (calcite) compensation depth (CCD)**", die rond de 4000 meter diepte ligt, lost alle carbonaat op, en kunnen er dus geen carbonaatafzettingen meer gevormd worden. Silicaskelletjes, bijvoorbeeld van diatomeeën, die op dezelfde wijze in de fotische zone worden gevormd en naar beneden regenen, lossen niet op onder de CCD, en de afzettingen die daar gevormd worden bestaan dus enkel uit "siliceous ooze". Na diagenese vormen deze "**bedded chert**" afzettingen.

Carbonaat gesteenten bestaan, net als siliciclastische gesteenten, uit een combinatie van korrels, matrix (**micriet** = microkristallijne calciet/aragoniet; gevormd door directe neerslag uit water, of door het uiteenvallen van incompleet gecalcificeerde skeletten, zoals die van groenwieren) en/of cement (meestal calciet). Het voornaamste verschil is dat de korrelvorm en korrelgrootte niet door processen zoals erosie en transport worden bepaald, maar meestal door biologische processen. Wanneer een carbonaatgesteente een goede sortering laat zien, kan dat dus niet gebruikt worden om iets te zeggen over de rijpheid van het sediment, of de transport-weg, hoogstens over de variëteit aan carbonaatvormende organismen die hebben bijgedragen aan het sediment. De mineralogie van carbonaatgesteenten is zeer eenvoudig: op het moment dat het materiaal wordt afgezet, bestaat het uit calciet en/of aragoniet. Tijdens diagenese wordt aragoniet omgezet naar calciet; eventueel kunnen calciet en aragoniet onder invloed van Mg-houdende vloeistoffen

omgezet worden tot dolomiet ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ).

### Carbonaatclasten

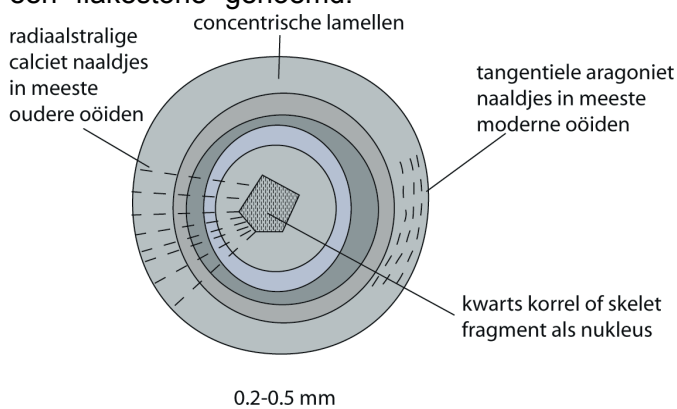
De meeste carbonaatclasten hebben een biogene origine. De volgende groepen organismen hebben doorheen de geologische geschiedenis een belangrijke bijdrage geleverd aan de vorming van carbonaatgesteenten:

- Mollusken
  - o bivalven
  - o gastropoden
  - o cephalopoden
- Brachiopoden
- Anthozoa (koralen)
- Echinodermata (zee-egels en -leliën)
- Bryozoa
- Foraminifera
- Arthropoden
- Porifera (sponzen; zelden van calciet, eerder silicaatskelet)
- Algen

Van deze laatsten verdienen de goudwieren, de Coccolithoporidae, speciale vermelding omdat ze met skeletjes van minder dan 0,1 mm doorsnee er in zijn geslaagd de bulk van de kalken tussen de 100 en 50 Ma zijn afgezet te produceren ("Krijt" kalken: witte kliffen van Dover).

Een belangrijke soort van niet-biogene carbonaatclasten zijn de **oöiden**. Oöiden zijn min of meer bolvormige korrels, die bestaan uit één of meer regelmatige concentrische lamellae rond een nucleus, gewoonlijk een carbonaat deeltje of een kwartskorrel (Fig. 8.11; zie ook les 2). De meeste oöiden die momenteel worden gevormd bestaan uit tangentieel georiënteerde aragoniet naaldjes van 2  $\mu\text{m}$  lengte. Oudere oöiden bestaan vaak uit radiaalstralige calciet naaldjes. Oöiden vormen in een ondiep, warm milieu, waar ze constant in beweging worden gehouden door golven, zoals de Bahama's. Wanneer een gesteente voornamelijk uit oöiden bestaat, wordt het een oöiet genoemd.

Een ander belangrijk niet-skeletaal korreltype in carbonaatgesteenten is de **intraclast**. Dit zijn fragmenten van (gedeeltelijk) gelithificeerd sediment. Een veel voorkomende type van intraclast in carbonaatgesteenten bestaat uit langwerpige stukjes van micritische mudstone, die opgebroken is door uitdroging (in de getijdenzone), of door stormwerking (onder zeeniveau). Een gesteente dat voor het grootste gedeelte uit dit soort stukjes bestaat wordt een "flakestone" genoemd.



*Fig. 8.11: Schematische doorsnee van een oöide.*

### Classificatie carbonaatgesteenten

De meest gebruikte, Engelstalige, classificatie van carbonaatgesteenten is die naar Dunham (1962) die in figuur 8.12 gegeven is. Bij deze indeling worden alle verschillende soorten korrels (skeletonderdelen, oöiden, intraclasten) bij elkaar genomen.

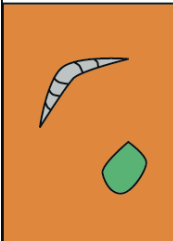
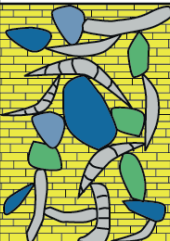
| mudstone                                                                          | wackestone                                                                        | packstone                                                                         | grainstone                                                                        | boundstone                                                                         | crystalline                                                                         |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |  |  |  |
| minder dan 10% korrels                                                            | meer dan 10% korrels                                                              | korrelskelet (grain-supported)                                                    | geen modder, korrelskelet (grain-supported)                                       | originele componenten zaten aan elkaar vast                                        | geen herkenbare afzettingstextuur                                                   |
| mudsupported                                                                      |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| bevat carbonaatmodder                                                             |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| originele componenten zaten niet aan elkaar vast                                  |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| herkenbare afzettingstextuur                                                      |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |

Fig. 8.12: Classificatie van carbonaatgesteenten naar Dunham (1962).

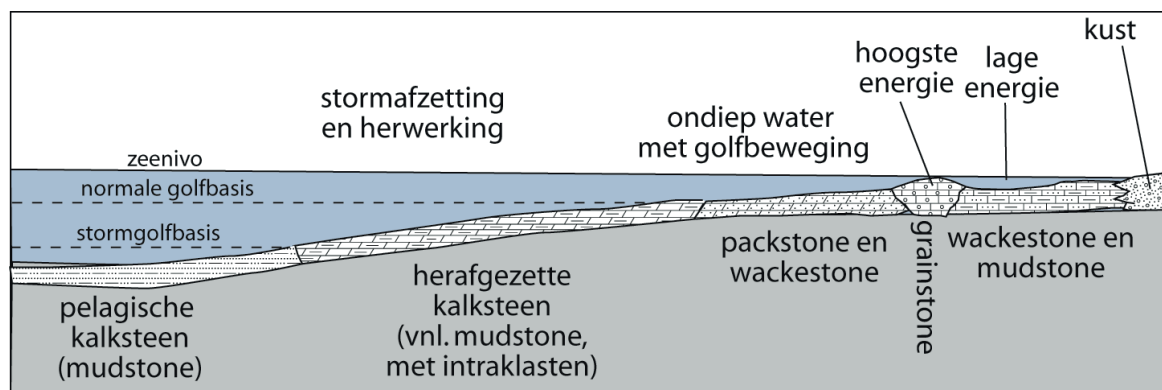


Fig. 8.13: Carbonaatgesteente in relatie tot marien afzettingsgebied. Het ondiepe hoge-energie milieu waar grainstones staan aangeduid zou ook een gebied kunnen zijn waar rif-gerelateerde carbonaten te vinden zijn.

Een **mudstone** en een **wackestone** bestaan beide uit korrels die in een matrix van fijnkorrelige kalkmodder drijven, maar de wackestone heeft meer dan 10% korrels, en de mudstone minder dan 10%. De **packstone** heeft nog steeds een matrix van kalkmodder, maar de korrels steunen op elkaar in plaats van los in de modder rond te zwemmen. Een **grainstone** heeft een zelfde korrelskelet als de packstone, maar heeft geen matrix van carbonaatmodder, maar een carbonaatcement dat de ruimte tussen de korrels opvult. De **boundstone** heeft een skelet van materialen die al van origine aan elkaar vastzaten, zoals bij riffen het geval is. Tenslotte is de **kristallijne kalksteen** geheel gerekristalliseerd, en is het niet meer te herkennen hoe de pre-rekristallisatie textuur er uit zag. Dit is een gevolg van diagenetische processen, en zegt dus niets over de afzettingstextuur van het gesteente. De verschillende soorten carbonaten worden in verschillende mariene milieus afgezet (Fig. 8.13).

### Vervanging en rekristallisatie

Sommige organismen bouwen hun skelet van aragoniet (b.v. de meeste bivalven) en andere van calciet (b.v. brachiopoden). Aragoniet is in principe niet stabiel aan het aardoppervlak, dus dit mineraal zal gedurende diagenese omgezet worden naar calciet. Hierbij gaat de interne structuur van het skelet meestal geheel verloren. Voormalig aragonitische klasten zijn dus te herkennen aan het feit dat ze na diagenese bestaan uit heldere, gerekristalliseerde

calciet, terwijl klasten die van origine al uit calciet bestonden over het algemeen niet gerekristalliseerd zullen zijn.

Een ander belangrijke vervangingsproces is de omzetting van calciet naar dolomiet. Dit gebeurt ook gedurende diagenese, door interactie met Mg-houdende vloeistoffen. Omdat dolomiet een veel kleiner kristalcel heeft dan calciet, zal dolomitatie leiden tot het ontstaan van zogenaamde secundaire porositeit. In tegenstelling tot calciet en aragoniet, bruist dolomiet niet of nauwelijks met 2N (~10%) HCl (enkel als je het eerst verpoedert). Het is ook goed te onderscheiden van siliciclastische gesteenten doordat het veel zachter is dan kwarts (wat het dominante mineraal is in siliciclastische gesteentes): dolomiet krast glas niet, de meeste siliciclastische gesteenten wel. Dolomiet heeft ook vaak een suikerachtig uiterlijk, waarop soms rhomboëdrische kristalvormen te onderscheiden zijn.

### **Travertijn en druipsteen**

Bijna alle carbonaatgesteenten worden gevormd in het mariene milieu. De enige uitzonderingen hierop vormen travertijn en druipsteen (speleothemen: stalactieten en stalacmieten). Deze calciumcarbonaat-gesteenten slaan neer in grotten of bij warme bronnen, zonder noodzakelijke tussenkomst van biogene activiteit (hoewel er tegenwoordig steeds meer aanwijzingen worden gevonden dat ook travertijn onder invloed van bacteriële activiteit ontstaat). Deze carbonaatgesteenten bestaan typisch uit enigszins onregelmatige laagjes, en bevatten ook vrij vaak veel holtes. Speleothemen hebben een colloforme of stalactitische textuur (les 2).

### **Silex / chert / vuursteen**

Biochemische silicaatgesteenten bestaan voor >99% uit  $\text{SiO}_2$  bestaan, meestal in "cryptokristallijne" vorm, wat wil zeggen dat de kristallen zo klein zijn dat je ze met de microscoop nog niet kunt zien. In hun naamgeving wordt vaak de Engelse terminologie aangehouden, waarbij een verschil wordt gemaakt tussen "nodular chert" (in het Nederlands soms ook (knollige) silex, of vuursteen genoemd) en "bedded chert" (in het Nederlands gebankte chert genoemd). De silica in beide soorten gesteenten is afkomstig van skeletfragmenten, voornamelijk van diatomeeën en radiolaria. Nodular chert wordt altijd gevonden als banden van knollen of onregelmatige banken binnen kalkstenen, met name krijt. Toen deze kalkstenen werden gevormd, zat er tussen de vele kalkskeletjes ook een kleine hoeveelheid silica-skeletjes. Deze silica is gedurende diagenese gemobiliseerd, en heeft zich daarna in bepaalde banden weer afgezet. Bedded cherts zijn ontstaan onder de carbonate compensation depth, waar carbonaat niet meer stabiel was, en enkel de silica-skeletjes afzettingen konden vormen.

Een speciale vorm van silica-afzettingen is opaal, dat bestaat uit een stapeling van kleine bolletje van silica. Fouten in de stapeling van de bolletjes zorgen voor veranderingen in lichtbreking, waardoor je verschillende kleuren te zien krijgt. Tenslotte kan de infiltratie van silicahoudende vloeistoffen ook zorgen voor de "verstening" van dode organismen, zoals bomen.

### **Evaporieten**

Chemische sedimenten worden ook wel evaporieten genoemd, omdat ze ontstaan door het indampen van zeewater. De samenstelling van zeewater wordt gegeven in figuur 8.14.

Zeewater bestaat voor 3,5 gewichtsprocent uit opgeloste ionen. De meestvoorkomende daarvan zijn  $\text{Na}^+$  en  $\text{Cl}^-$ , de bestanddelen van haliet, of keukenzout. Als je zeewater indamppt zal het eerste mineraal dat neerslaat niet haliet zijn, maar gips, omdat de oplosbaarheid van gips minder groot is dan die van haliet. Als de indamping verder gaat is het volgende mineraal dat neerslaat haliet, en daarna pas kalium- en magnesiumchlorides, die extreem goed oplosbaar zijn. Wanneer je een bepaald volume zeewater volledig indamppt, houd je dus voornamelijk  $\text{NaCl}$  over (78%), plus  $\text{MgCl}_2$  (9,4%),  $\text{MgSO}_4$  (5,7%), en slechts 3,6% gips/anhydriet en 0,4% calciet en dolomiet. Echter, wanneer je naar geologische evaporiet afzettingen kijkt, vind je te veel gips, calciet en dolomiet, en te weinig van de laat-neerslaande zouten zoals bischofiet. Dit komt doordat evaporieten ontstaan door het slechts



gedeeltelijk indampen van zeewater in een semi-gesloten basin (fig. 8.15), waar regelmatig weer vers zeewater binnenloopt. Voordat de indamping zo ver gaat dat er zeer goed oplosbare zouten neerslaan zal er dus weer vers water zijn binnengekomen, dat gedurende indamping eerst weer gips en haliet neerslaat.

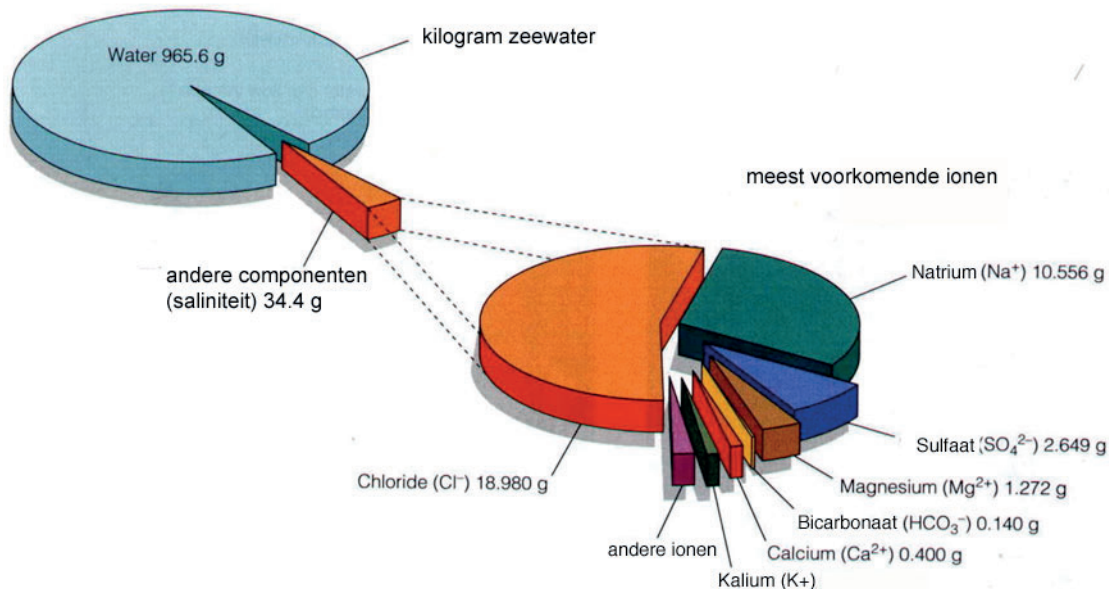


Fig. 8.14: Samenstelling van zeewater.

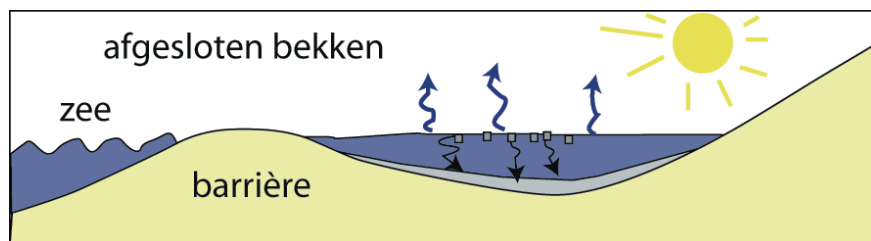


Fig. 8.15: Vorming van evaporieten in een afgesloten bekken, dat regelmatig weer wordt aangevuld met zeewater.

### Koolhoudende gesteenten

Een laatste belangrijke vorm van biochemische sedimenten zijn koolhoudende gesteenten. Deze variëren in samenstelling van turf tot grafiet. Naarmate het materiaal dieper begraven is geweest en daarmee hogere temperaturen gezien zal hebben, zal de inkolingsgraad van het materiaal veranderen. Tegelijk varieert het percentage aan volatiele bestanddelen (water en koolwaterstoffen; "V" in de onderstaande tabel).

| Inkolingsgraad      | Karakteristieken                                                     | % V |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------|-----|
| plant (hout)        | onveranderd hout                                                     | 80% |
| turf                | grote poriën, details van plantmateriaal nog herkenbaar (phytoclast) | 65% |
| bruinkool (lignite) | details van plantmateriaal nog (deels) herkenbaar                    | 50% |
| bitumineuze kool    | dof zwart, compact                                                   | 45% |
| anthraciet          | glanzend zwart, compact                                              | 10% |
| grafiet (C)         | zuiver koolstof, zwart mineraal, metallische glans, hardheid 1       | 0%  |

Steenkool wordt gevormd uit landplanten, en wordt dus gevonden in continentale sedimenten (dus sedimenten die op het continent zijn afgezet, zoals in een rivier of meer). De kleur van koolhoudende gesteenten is typisch zwart, en het afzettingsmilieu was reducerend, omdat anders al het materiaal weer geoxideerd zou zijn tot CO<sub>2</sub>.

Het beginmateriaal waar olie uit gevormd wordt is daarentegen plankton, dus olie (en gas) wordt voornamelijk in mariene afzettingen (in zee afgezet) gevonden.