

**Inhoud:**

|                                                       |    |                                                       |               |
|-------------------------------------------------------|----|-------------------------------------------------------|---------------|
| Metamorfose . . . . .                                 | 57 | Het ei van Columbus                                   |               |
| Kobalt, een kleurrijk metaal met streken . . . . .    | 68 | Tips van amateurs voor amateurs . . . . .             | 84            |
| Nannofossielen in het Mioceen van Antwerpen . . . . . | 73 | Verboden toegang, zoekbeperkingen in Europa . . . . . | 85            |
| De diatomeeënaarde-afzettingen bij Lüneburg (BRD) 78  |    | Boekbesprekingen . . . . .                            | 86            |
| De Middellandse Zeewoestijn . . . . .                 | 82 | Van de redactie . . . . .                             | naast pag. 88 |
| Een statief voor micromounts . . . . .                | 83 | Strontianiet . . . . .                                | naast pag. 88 |

# METAMORFOSE

door drs. W.C.P. de Vries

## Omschrijving en processen

De gesteenten van de aardkorst worden algemeen ingedeeld in drie groepen: stollingsgesteenten, sedimenten en metamorfe gesteenten. De kenmerken waarop de indeling is gebaseerd maken over het algemeen het onderscheid tussen de groepen goed mogelijk. Wel bestaat er bijvoorbeeld in het grensgebied van metamorfe en stollingsgesteenten enige onzekerheid: van vele granietische gesteenten is het veelal helemaal niet zeker of zij een resultaat zijn van hoge metamorfose dan wel een echt stollingsgesteente vertegenwoordigen.

Daarnaast kan men zich afvragen in hoeverre een pyroklastisch gesteente een stollingsgesteente is dan wel tot de sedimenten moet worden gerekend. (Een pyroklastisch gesteente is ontstaan door vergruizing van een vast gesteente tijdens een explosieve vulkanische uitbarsting en is als aslagen uit de door de vulkaan uitgestoten gruiswolken neergelegd.)

Stollingsgesteenten zijn aggregaten van mineralen die uitgekristalliseerd zijn uit een gesteentesmelt, een magma. De vorming van de kristallen vindt plaats in het temperatuurbereik tussen 1200 en 600 graden Celcius. Als de afkoeling aan het aardoppervlak plaats vindt, zoals in een uitgevloeiende lavastroom, dan zal dit proces zo snel verlopen dat er een glasachtig gesteente ontstaat. Kristallijne stollingsgesteenten ontstaan dan ook op enige diepte in de aardkorst, van een enkele kilometer tot tientallen kilometers diepte.

Gesteenten die zich aan of zeer nabij de aardoppervlakte bevinden worden afgebroken door processen van verweering en erosie, de afbraakprodukten worden weggevoerd door wind en water en ergens anders neergelegd, ofwel gesedimenteerd, en vormen zo vertegenwoordigers van de groep der sedimentaire gesteenten. Het zachte, vers

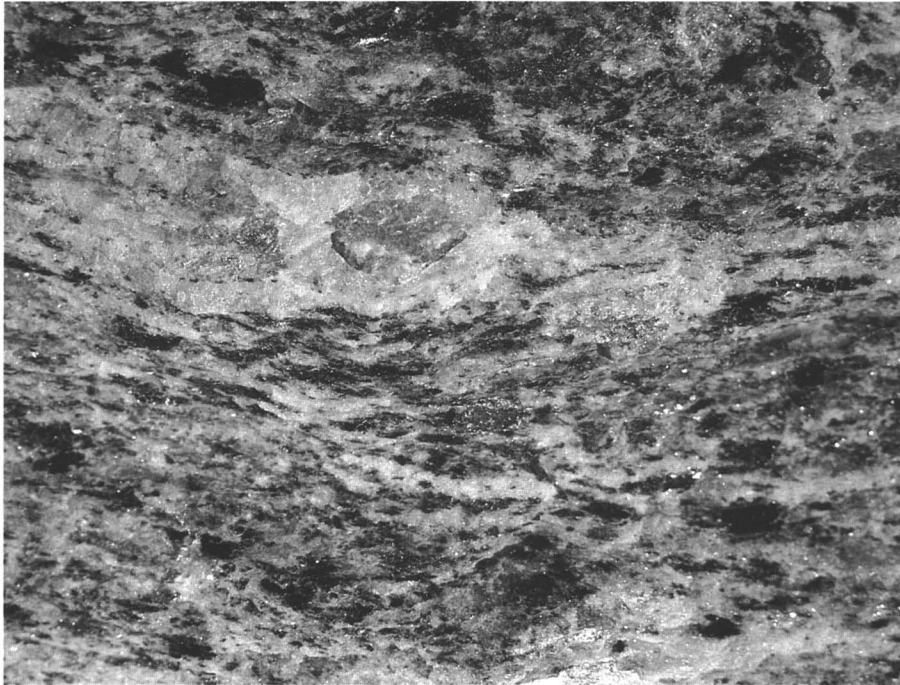
afgezette sediment wordt in de loop van de tijd verhard door het proces van diagenese, ofwel lithificatie (= gesteentevorming). Dit proces omvat: compactie, cementatie en een begin van rekristallisatie. Sedimentaire gesteenten en stollingsgesteenten kunnen dus veranderingen ondergaan door de verweering en de erosie. Deze veranderingen houden een fysische gedaanteverandering in: het vaste gesteente valt uiteen in losse korrels; alsmede chemische veranderingen: bepaalde mineralen worden chemisch afgebroken. Zo ontstaan uit de veldspaten de kleimineralen. Deze processen treden aan of zeer dicht onder het aardoppervlak op. Daarnaast ondergaan de gesteenten veranderingen als zij worden onderworpen aan de condities die heersen op grotere diepte in de aardkorst, waar de temperatuur en druk zeer hoge waarden bereiken\*.

Door invloed van de hogere temperatuur en druk zal er een verandering optreden in de mineralogische samenstelling en de textuur van het gesteente. (Textuur geeft de microscopische eigenschappen van het gesteente aan als: kristalgrootte; de oriëntatie van kristallen; de onderlinge verhouding, bv. het ene mineraal heeft zijn fraaie, idiomorfe kristalvorm, het andere heeft slechts genoegen moeten nemen met de beschikbare ruimte, enz.)

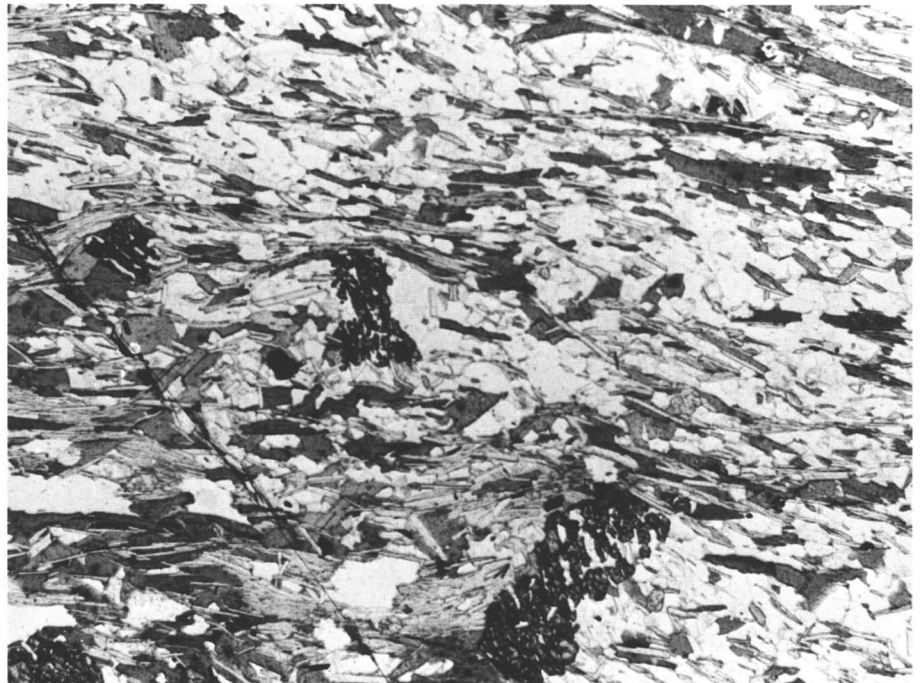
Metamorfose heeft dus als resultaat een verandering in de mineralogische samenstelling en de textuur van een gesteente.

Ook de verweering en gedeeltelijk ook de diagenetische

\* ) Over het algemeen bedraagt de temperatuurstijging naar de diepte toe tussen de 15 en 30 °C per km. Deze waarde noemt men de geothermische gradiënt. De toeneming van de druk met de diepte onder het aardoppervlak bedraagt ± 300 atmosfeer per km.



*Afb. 1 A. Handstuk van een metamorf gesteente met duidelijke schistositeit. Zwarte, platige biotietkristallen liggen evenwijdig tussen lichte kwarts- en veldspaatkristallen. Enkele, ongeveer 7 mm grote, granaten liggen in een bandje met veel kwarts. Het gesteente is een granaat-biotietschist, afkomstig van het Gotthard-massief, Tessin, Zwitserland. Vergroting x 2,25.*



*Afb. 1 B. Slijpplaatje van een stauroliet-glimmerschist uit Noorwegen. De vergroting is ongeveer 40 x. Op microscopische schaal is de parallelle oriëntatie van de mineralen, waarvan de lange en/of platte zijden loodrecht op de drukrichting staan, gemakkelijk herkenbaar.*

processen veroorzaken mineraal- en textuurverandering. Metamorfose is echter beperkt tot die processen, welke plaats vinden onder hogere temperatuur en/of hogere druk; het proces van mineralogische verandering vindt daarbij plaats in het **vaste** gesteente. Dit proces wordt genoemd de metamorfe rekristallisatie, veelal alleen aangeduid met rekristallisatie.

Veranderingen die door metamorfe processen teweeg werden gebracht, kunnen worden bestudeerd in een slijpplaatje, een handstuk of een ontsluiting. Afb. 1. Er zijn bepaalde typen van metamorfose, waarbij de invloed van de verandering niet verder merkbaar is geworden dan ter grootte van een handstuk, zoals de beïnvloeding van het nevgesteente langs het contact met een

lava. Dit betreft bv. de pyrometamorfose, die een zeer plaatselijk effect heeft.

Een ander type van metamorfose is van wereldwijde schaal en hangt samen met de grote tektonische processen in de aardkorst, zoals de vorming van de gebergtegordels, welk proces geologisch gezien van het grootste belang is. Intensiteit en type van deze metamorfose hebben een directe relatie met de voortgang van de processen die optreden tijdens de verschillende fasen van de gebergtevorming. Deze processen betreffen, onder meer, de samendrukkende bewegingen die de gesteenteseries hebben geplooid; het optreden van de krachten die de dekbladen hebben gevormd en deze gesteenteseries, soms afkomstig uit ver uiteenliggende gebieden, over elkaar heen hebben geschoven over grote afstanden; het wegzak-

ken van gesteenten in de diepere gedeelten van de korst door de opstapeling der dekbladen. Elk van deze processen geeft een bepaald verloop van de temperatuur en de druk tijdens de voortgang van het proces. De metamorfe mineraalgezelschappen die in de verschillende gesteenten worden gevonden geven dus een aanwijzing tot de omstandigheden die in de loop van de tektonische processen hebben geheerst.

Naast de veranderingen in de temperatuur (aangeduid als T) en de druk (P), vinden er ook veranderingen plaats in de chemische omstandigheden tijdens de metamorfe processen. Deze chemische veranderingen worden teweeg gebracht door het door de aardkorst circulerende water, dat op grote diepte natuurlijk een hoge temperatuur heeft. Dit water helpt actief mee met het op gang houden van de rekristallisatieprocessen, mede door aanvoer van bepaalde chemische bestanddelen en afvoer van andere chemische elementen. Dit grootschalige metamorfe proces kan worden gedefinieerd als het mineralogisch en textueel resultaat van de fysisch/chemische omstandigheden in de gesteentelichamen die werden onderworpen aan de tektonische processen. Daarnaast is natuurlijk ook een metamorf proces op kleine schaal, zoals de pyrometamorfose, een uiting van bepaalde veranderingen in de fysisch/chemische omstandigheden.

### Onder- en bovengrens van metamorfose

De ondergrens van de metamorfose is de grens met de diagenetische processen, welke laatste plaats vinden bij temperaturen, die slechts weinig verschillen van die tijdens de sedimentatie. De grens met metamorfose zal daar gelegd moeten worden, waar bepaalde, duidelijk gedefinieerde, mineralogische veranderingen gaan optreden. Deze veranderingen worden voornamelijk bepaald door verhoging van temperatuur. De invloed van de temperatuursverhoging is echter weer afhankelijk van de samenstelling, van het chemisme van het gesteente, en hierin zit natuurlijk een grote variatie.

Over het algemeen wordt aangenomen dat de ondergrens van de metamorfose wat betreft de temperatuurwaarde ligt bij ongeveer 150 graden Celcius.

Als een gesteente bij het steeds dieper in de korst wegzinken zo ver wordt verhit dat een gedeelte gaat smelten, dan moet het gesmolten deel van het gesteente worden opgevat als een magma. Het gesteente dat zich door kristallisatie uit deze smelt vormt, is een stollingsgesteente.

Metamorfose wordt dan ook gedefinieerd als **een proces dat zich voltrekt in een wezenlijk vast gesteente**, bij een temperatuur die blijft onder die waarbij het gesteente zal gaan smelten. Het is daarbij geen bezwaar dat er een kleine hoeveelheid silicaatsmelt of waterige vloeistof in de ruimten tussen de kristallen aanwezig is.

Een aanwijzing over de omstandigheden bij de bovengrens van de metamorfose wordt verkregen uit experimenten waarbij gesteenten worden gesmolten. Bij drukken die in de aardkorst voorkomen en die gelegen zijn tussen 0 en 10.000 atmosfeer, heeft een granietisch gesteente een relatief laag smeltpunt: bij 1 atmosfeer druk ligt het smeltpunt bij ongeveer 950 graden Celcius. Bij hogere druk zakt de smelttemperatuur en bedraagt bij 10.000 atmosfeer 620 graden Celcius. Ter vergelijking: bazalt smelt onder 1 atmosfeer druk bij 1000 - 1100 graden Celcius, doch bij 10.000 atmosfeer bij ongeveer dezelfde temperatuur als graniet. Hieruit mag worden geconcludeerd dat in het overgrote gedeelte van de gesteenten de hoge-temperatuurgrens voor metamorfose ligt tussen de

700 en 900 graden Celcius, mits er enige waterige vloeistof aanwezig is. Over deze laatste voorwaarde is men het echter niet eens. Indien er geen waterige vloeistof op grotere diepte aanwezig is betekent dit wel, dat dan de waarde voor de temperatuur van de bovengrens van metamorfe processen belangrijk hoger zal moeten zijn.

### Relatie tussen metamorfose en de grote structuren der aardkorst

De studie van metamorfose is een belangrijk hulpmiddel bij het ontrafelen van de voortgang van grote geologische processen in de aardkorst. Allereerst denken we hierbij aan de plaattektoniek. Grootschalige metamorfose treedt op in de gebieden waar platen ontstaan: in de mid-oceanische ruggen waar de uitelkaar gaande beweging optreedt, en in de gebieden waar de platen bij elkaar komen: de "convergent junctures". De convergentie-zones van de platen, die zich veelal manifesteren als de diepzeetroggen, worden wel gedacht de plaatsen te vertegenwoordigen waar de orogene gordels, de gordels van gebergtevorming, zijn gelegen. De over grote gebieden optredende metamorfose in de orogene gordels wordt regionale metamorfose genoemd.

Behalve dat metamorfe processen in de actieve gordels van de aardkorst optreden, mag worden aangenomen, dat ook in de niet-actieve, "stabiele" gedeelten metamorfose plaats vindt. De aardkorst in de stabiele gedeelten, zoals de Precambrische schilden, is in ieder geval 30 km dik; drukken en temperaturen in de diepere gedeelten zullen zodanige waarden hebben dat er metamorfe processen moeten zijn opgetreden, die zich waarschijnlijk wel in een langzamer tempo zullen voltrekken dan in de orogene gordels. Voor dit type van metamorfose bestaat nog geen bepaalde naam.

Gesteenten die werden onderworpen aan regionale metamorfose komen gewoonlijk voor in langgerekte gordels, tientallen tot enkele honderden kilometers breed en soms vele duizenden kilometers lang. De gesteenten omvatten leien, fyllieten, schisten en gneizen, die vaak sterk geplooid zijn. Deze gesteenten hebben als algemene karakteristiek een duidelijke rangschikking van de mineralen in één bepaald vlak, genoemd de schistositeit, welke schistositeit het beste tot uiting komt door de rangschikking van plaatvormige mineralen zoals de glimmermineralen (muskoviet, biotiet). In vele regionaal metamorfe gordels worden granietische massa's gevonden, die zijn geïntroduceerd in de geplooidde series. Ook worden basische tot ultrabasische intrusiva gevonden.

De relatie tussen de metamorfe processen en de intrusieve gesteenten is bepaald niet altijd duidelijk. In enkele gevallen is te zien dat de granietintrusie van een duidelijk jongere datum is. De belangrijke perioden van metamorfe rekristallisatie zijn dan al achter de rug, de graniet is dan laat- of posttektonisch.

Regionale metamorfose is veelal een langdurig proces dat meerdere fasen van rekristallisatie onder verschillende omstandigheden toont. Een proces van metamorfose waarbij schisteuse gesteenten ontstaan is duidelijk geassocieerd met een periode van grote (druk-)spanningen in dat gedeelte van de aardkorst. Er komen echter ook rekristallisatiefasen voor waarbij de spanning een geringere rol speelde; microscopisch onderzoek geeft inzicht in de verschillende fasen van kristalgroei onder de wisselende structurele omstandigheden.

De kennis van metamorfose is tot voor kort uitsluitend gebaseerd geweest op de observaties op het landoppervlak.

Het bestaan van een speciaal type van metamorfose in de oceanen is pas ontdekt met de boorprogramma's, die in het kader van het Mohole project werden ondernomen. De oceaانبodem bestaat voor het grootste gedeelte uit bazaltisch gesteente, welke laag echter zeer dun is, waarschijnlijk niet dikker dan twee kilometer. De eronder liggende laag bestaat voornamelijk uit metamorfe basische en ultrabasische gesteenten. De metamorfose van deze gesteenten is voor een groot gedeelte bepaald door een hoge temperatuur en heeft waarschijnlijk vrijwel uitsluitend plaats gevonden in de mid-oceanische ruggen. Voor dit type van mid-oceanische metamorfose is wel de term "oceaانبodem-metamorfose" voorgesteld. De gesteenten die onder deze omstandigheden zijn gemetamorfiseerd tonen geen schistositeit. Voorbeelden van oceaانبodem-metamorfose geven het Troodos-massief van ZW-Cyprus en het Vourinos-complex in Griekenland. Over de oceaانبodem-metamorfose is nog weinig bekend.

Contactmetamorfose betreft de rekristallisatie van gesteenten langs de randen van een intrusiemassa. De metamorfose vindt voornamelijk plaats door temperatuursverhoging. Daarnaast heeft het intrusiegesteente zelf in vele gevallen een grote invloed doordat een waterige vloeistof, geladen met chemische bestanddelen, vanuit de plutoon in het contactgesteente dringt en in het contactgesteente aanleiding geeft tot de vorming van een aantal karakteristieke mineralen. Een typerend gesteente voor de contact-metamorfe zone is de hoornrots; dit gesteente toont geen enkele schistositeit.

Pyrometamorfose mag als een speciale, extreme en zeer lokaal optredende vorm van contactmetamorfose worden beschouwd.

Metamorfose door aanvoer van chemische bestanddelen in een waterige oplossing geeft ook als resultaat de hydrothermale metamorfose, waarbij aders ontstaan.

Cataclastische metamorfose, tenslotte, uit zich in het kraken en vergruizen van gesteente als gevolg van breukbewegingen. Dit proces wordt ook wel dislocatie- of dynamische metamorfose genoemd. Bij deze vorm van metamorfose is de rekristallisatie slechts een ondergeschikt verschijnsel. Grote breuken op aarde zijn dikwijls vergezeld door een brede zone van vergruisd gesteente, de 'shatter belt' die soms kilometers breed is.

## Historische ontwikkeling

De eerste geoloog, die heeft onderkend dat er processen plaats vinden die sedimentaire gesteenten kunnen doen veranderen, doordat deze gesteenten diep in de aarde worden gebracht, was James Hutton. Het was daarna Lyell, in zijn beroemde werk "Principles of Geology", verschenen in 1833, die bekendheid heeft gegeven aan deze processen van metamorfe verandering.

Gedurende deze periode, in de eerste helft van de vorige eeuw, was het idee nog algemeen in zwang dat gneizen gesteenten waren van de geologisch oudste perioden; de minder sterk metamorfe schisten zouden uit een jongere periode dateren en de fyllieten waren van nog geringere ouderdom. Daarna zouden pas de fossielhoudende sedimentaire gesteenten gevormd zijn. Pas in het begin van de tweede helft van de 19de eeuw zou de mening postvatten dat metamorfe gesteenten gevormd zijn uit sedimentaire gesteenten van allerlei ouderdommen. Dit werd afgeleid uit het feit dat men overgangen zag tussen metamorfe en niet-metamorfe gesteenten.

De ontdekking en beschrijving van de geosynclinale theorie voor de gebergtevorming en de relatie met de

regionale metamorfose vond plaats in de tweede helft van de vorige eeuw door onder meer Hall, Dana en Haug. Zij verklaarden de effecten van de regionale metamorfose door het optreden van hoge temperatuur en hoge druk, alsmede door de bewegingen die de gesteenten hebben gedeformeerd. Er vormden zich daarbij een tweetal 'scholen' of denkrichtingen over de voornaamste oorzaak van regionale metamorfose. Een school legde de nadruk op de hoge temperaturen in de diepere delen van de dichtgevouwen geosynclinale, waar plutonische massa's zorgen voor de warmtetoevoer. De aanhangers van de andere richting hechtten meer belang aan het optreden van de druk, hetzij in de vorm van de alzijdige druk (de druk die ontstaat door de bovenliggende gesteentekolom), ook aangeduid met de gesteentedruk, hetzij als 'hydrostatische' druk, de druk van het water in het systeem, met daarnaast druk in de vorm van de deformerende bewegingen, ofwel de vervormingsspanning.

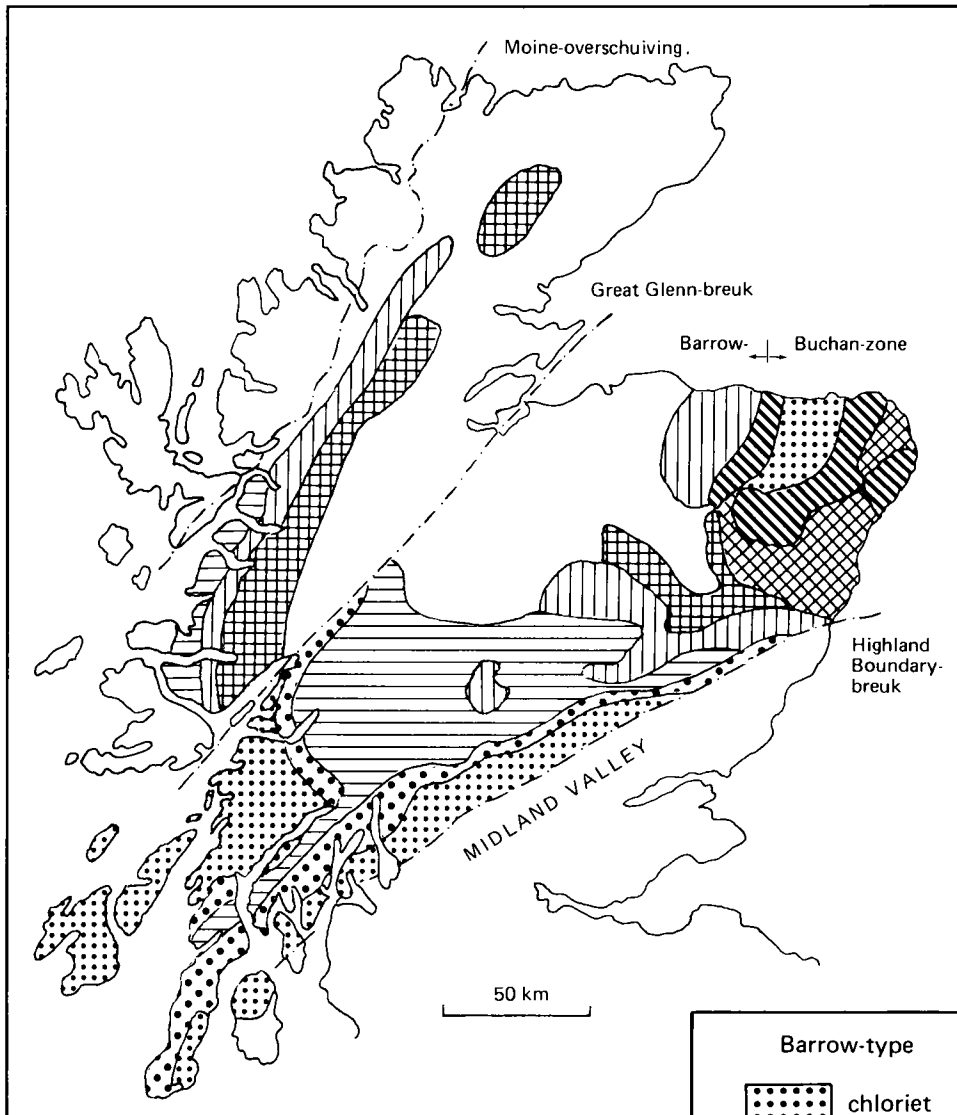
De eerste school vond aanhangers in Engeland en Frankrijk, waar de term 'plutonische metamorfose' wel werd gebruikt. Vooral de Fransen benadrukten de invloed van de waterige vloeistof die vele chemische bestanddelen uit de plutonische massa naar het omringende gesteente voert. De school die meer nadruk legt op de effecten van de druk en van de bewegingen werd gevormd door Duitse en Zwitserse geologen. Hier was de aanduiding "dynamische" of "dislocatie-metamorfose" in zwang. Dynamische metamorfose was een term die door Rosenbusch werd geïntroduceerd en die tot op heden nog wel wordt gebruikt voor de regionale metamorfose. De termen 'dynamische metamorfose' en 'dislocatie-metamorfose' werden echter in latere tijd synoniem met cataclastische metamorfose. Dit zijn slechts enkele voorbeelden van de verwarring die er op dit gebied heerst.

Een reden voor het ontstaan van de twee 'scholen' is dat in vele regionaal metamorfe gebieden van Engeland en Frankrijk de metamorfe complexen grote hoeveelheden granietische gesteenten bevatten, zoals bv. Devon, Massif Central, Bretagne. Dit zijn gebieden die tijdens oudere gebergtevormende perioden, zoals de Hercynische en Caledonische orogenesen, zijn gevormd. De Alpen metamorfe gesteenten in de Zuid Europese Alpengordels daarentegen, zijn echter zelden geassocieerd met granietintrusies.

## Metamorfe zones

De laatste drie decennia van de vorige eeuw was de grote tijd van de microscopische beschrijving van de gesteenten en de tijd dat de basis werd gelegd voor de gesteente-indelingen. Voor de regionaal metamorfe gesteenten werd de basis gelegd door Grubenmann met zijn boek "Die kristallinen Schiefer", geschreven in de periode 1904-1906. Naast een verdeling van de regionaal metamorfe gesteenten in een twaalfstal groepen, gebaseerd op de chemische samenstelling, werd in alle groepen een parallelle indeling gemaakt naar de sterkte van de metamorfe verandering. Zo werden onderscheiden: de epizone (de ondiepe zone), waarvan de omstandigheden tijdens de metamorfose gekarakteriseerd zijn door een relatief lage druk, lage temperatuur en sterke deformatie; als hoogste zone de katazone met hoge druk, hoge temperatuur en zwakke deformatie, met daartussen een intermediaire meso-zone. Zo werden alle regionaal metamorfe gesteenten in een der drie zones ondergebracht: fylliet, chlorietschist en glaukafaanschist zijn resultaten van de metamorfose in de epizone; glimmerschist en amfiboliet behoren tot de meso-zone en gneizen en eclogiet tot de katametamorfe gesteenten.

Grubenmann bekeek daarbij ieder gesteente op zichzelf,



Afb. 2. Zones van progressieve regionale metamorfose van het Barrow- en Buchan-type in de Schotse Hooglanden. Het Buchan-type is gekarakteriseerd door het voorkomen van andalusiet in plaats van granaat en kyaniet in het Barrow-type. Bij het Buchan-type van regionale metamorfose was de temperatuur relatief hoger en de druk lager dan bij die van het Barrow-type (vergelijk het Abukuma-type; zie de tekst).

| Barrow-type | Buchan-type |
|-------------|-------------|
| chloriet    | chloriet    |
| biotiet     | andalusiet  |
| granaat     | sillimaniet |
| kyaniet     |             |
| sillimaniet |             |

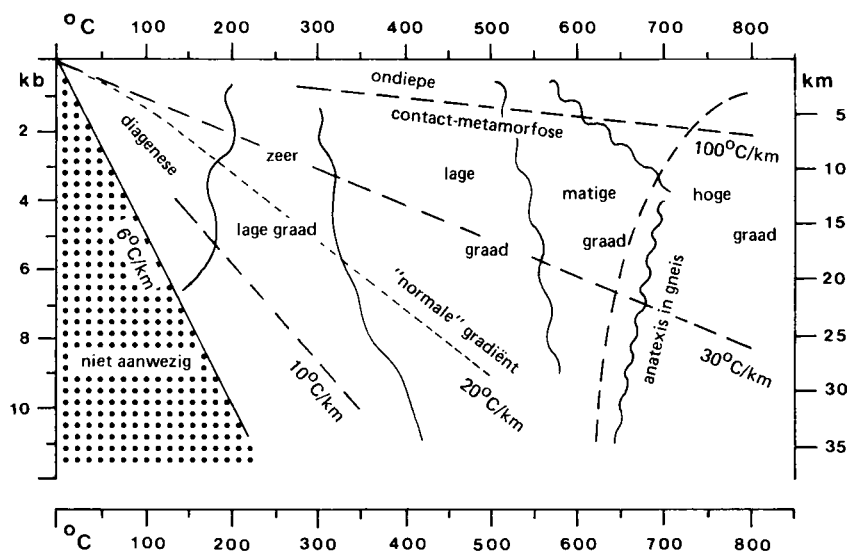
latere onderzoekers richtten hun aandacht op de omstandigheden in het veld en op de relaties tussen de verschillende gesteenten. Hieruit is het moderne concept van de metamorfe zonering, ofwel de progressieve metamorfe zones ontstaan. Hierbij wordt het effect van toenemende metamorfose in een bepaald gesteentetype beschreven aan de hand van het achtereenvolgens verschijnen van bepaalde mineralen die typerend zijn voor een bepaalde fase van de metamorfose. Zo zijn door Barrow, later aangevuld door Harker, de Barrovian Zones van progressieve regionale metamorfose opgesteld, welke zonering algemeen ingang heeft gevonden.

In de Schotse Hooglanden werd door Barrow in een serie niet tot nauwelijks metamorfe kleiige gesteenten een toenemende graad van metamorfose beschreven, waarbij de oorspronkelijke schalies en leien overgingen in fylliet,

dan glimmerschist en daarna in gneizen. Deze Zones van Barrow worden getypeerd door het optreden van de volgende mineralen (zie afb. 2):

1. chloriet-zone, gekarakteriseerd door het optreden van chloriet-muskovietfylliet of -schist;
2. biotiet-zone, waarin biotiet verschijnt, die in hogere zones aanwezig blijft;
3. almandien-zone; de granaat blijft ook in de hogere zones bestaan;
4. stauroliet-zone;
5. kyaniet-zone;
6. sillimaniet-zone. In deze zone verdwijnt de kyaniet.

Gaande van een lagere metamorfe zone in de volgende zone, kan men de punten waar één van de indexmineralen verschijnt, aangeven op de kaart. De lijn die alle punten waar één mineraal verschijnt met elkaar verbindt, is de



Afb. 3. Graden van metamorfose, in relatie tot de heersende druk en temperatuur (P/T-diagram). De druk is in kilobars: 1 kb is ongeveer 1000 atm. De aanduiding in km geeft bij benadering de overeenkomstige diepte in de aardkorst. De stippellijnen met 6 ° C/km, enz., slaan op de betreffende geothermische gradiënt. (Naar H.G.F. Winkler, 1979: *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*)

zogenoemde isograad: de lijn die de gesteenten met elkaar verbindt die werden gemetamorfoseerd onder gelijke waarden voor temperatuur en druk. Voor de meeste isograden telt, dat de invloed van de temperatuur overheersend was en veelal kan men dan ook stellen dat isograden overeenkomen met lijnen van gelijke temperatuursverhoging.

De term 'graad van metamorfose' wordt algemeen gebruikt. Afb. 3. Het is echter lang niet altijd duidelijk welke betekenis aan het gebruik van de term wordt gehecht. Wat is bijvoorbeeld het antwoord op de vraag, welk gesteente een hogere graad van metamorfose heeft ondergaan: een gesteente gerekristalliseerd onder hoge temperatuur en lage druk of onder hoge druk en lage temperatuur?

## Metasomatose

De verandering in mineraalsamenstelling van gemetamorfoseerde gesteenten brengt in vele gevallen ook een noodzakelijke verandering in de chemische samenstelling met zich mede. De vragen over welke chemische bestanddelen dan verdwijnen en welke bestanddelen worden aangevoerd, alsmede over het mechanisme van dit transport, zijn bepaald nog niet allemaal naar tevredenheid beantwoord.

De migratie van chemische bestanddelen veroorzaakt een verandering in de samenstelling van het gesteente. De verandering in mineraalsamenstelling die wordt veroorzaakt door deze uitwisseling heet metasomatose. Deze vervanging wordt verzorgd door de werking van de hete waterige vloeistof waarin de chemische bestanddelen zijn opgelost; de metasomatose voltrekt zich atoom voor atoom in de vaste toestand (fase) van het gesteente.

De aanduiding metasomatose wordt algemeen gebruikt bij de vorming van ertsaders, waar het bestaande gesteente gedeeltelijk of geheel wordt vervangen door adermineraal en erts.

De chemische veranderingen die tijdens de voortgaande progressie van de metamorfose optreden uiteten zich in eerste instantie in het verlagen van het water- en CO<sub>2</sub>-gehalte, daarnaast neemt de hoeveelheid aan ferri-ionen (Fe<sup>+++</sup>) af en die van de ferro-(Fe<sup>++</sup>-)mineralen toe. In sommige gebieden heeft op grote schaal een toename van het gehalte aan natrium en kalium plaatsgevonden, vooral bij de overgang van fyllieten en schisten naar gneizen.

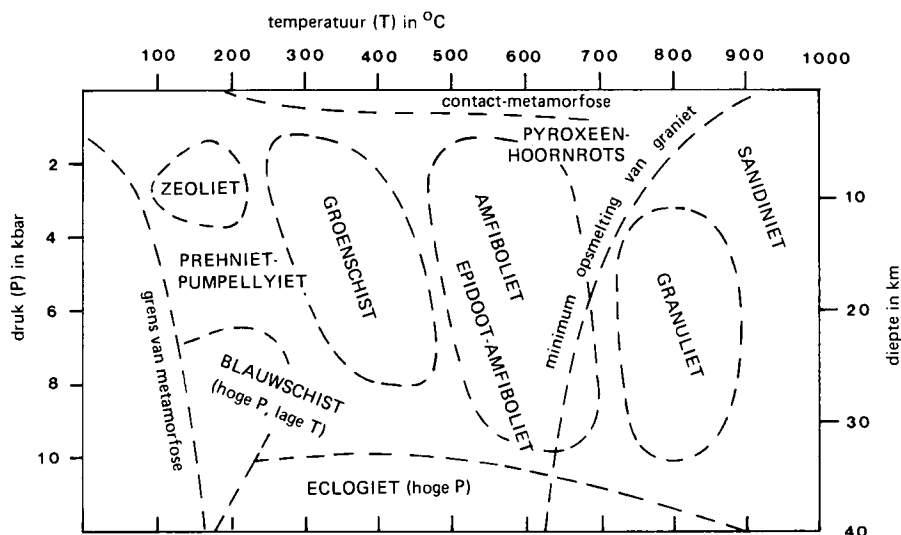
Alle genoemde veranderingen zijn precies het omgekeerde van de processen die zich afspelen tijdens de verwering. Verwering houdt voor vele mineralen een hydratering in (bv. veldspaat verandert in een kleimineraal); vrijgekomen elementen als natrium en kalium worden in de vorm van oplosbare zouten door het regen- en grondwater afgevoerd.

De bron waaruit tijdens metamorfe processen voor aanvoer van natrium en kalium geput kan worden, is niet moeilijk te vinden: een sediment bevat zout water dat 'ingevangen' is tijdens de sedimentatie. Zelfs op een diepte van meerdere kilometers is nog altijd enkele procenten poriënvolume in het gesteente aanwezig, waarin het water is opgeslagen en waardoor de circulatie van de vloeistof plaats kan vinden.

Met de activiteit van water en CO<sub>2</sub> worden de alkali-elementen (Na en K) dus verplaatst. Daarnaast zijn ook calcium, aluminium en silicium, waarschijnlijk in de vorm van hun oxyden, gemakkelijk verplaatsbaar in een waterige oplossing bij relatief lage temperatuur. Een bewijs daarvoor is het frequent voorkomen van kwartsaders in laag-metamorfe gesteenteseries als leien en fyllieten. Een ander duidelijk bewijs van migratie van chemische bestanddelen is het voorkomen van pegmatietgangen in hoog-metamorfe gesteenteseries, welke aders ook worden gevormd door mineralen die worden verplaatst in een hete waterige oplossing. Beide factoren, dus het voorkomen van de kwartsaders in laag-metamorfe series en de pegmatietgangen in hoog-metamorfe gebieden, geven aan dat er een rechtstreekse relatie is tussen de vorming van de aders door de migratie en de metamorfe processen.

## Metamorfe faciës

Na de vondst en formulering van de drie zones van regionale metamorfose werd snel duidelijk dat er meerdere lijnen kunnen worden onderscheiden van druk- en temperatuurverhoudingen waarlangs een toenemende metamorfose zich kan ontwikkelen. Zo werden er regionaal metamorfe series gevonden waarin de invloed van de temperatuur overheerste doordat de druk relatief laag was en langzaam opliep; in andere gebieden was echter de waarde voor de druk van het begin af aan zeer hoog en had deze dus een relatief grotere invloed dan de temperatuur. Zo werd uit het begrip van de metamorfe zones het begrip



Afb. 4. P/T-diagram met de ligging van de verschillende faciëstypen van regionale metamorfose, te vergelijken met afb. 3. De in de tekst genoemde prehniet-pumpellyiet-faciës ligt tussen de zeoliet- en blauwschist-faciës in. Naar C. Gillen, 1982, *Metamorphic Geology*, en A. Miyashiro, 1979.

metamorfe faciës ontwikkeld, dat in zekere zin analoog is aan dat van de sedimentaire faciës.

De definitie van metamorfe faciës luidt heel simpel: alle gesteenten die zijn gerekristalliseerd onder dezelfde condities behoren tot eenzelfde metamorfe faciës. Dit wil zeggen, dat een metamorfe faciës alle gesteenten omvat die het resultaat zijn van de samenwerking van identieke factoren die van buiten af op het systeem, dus: het gesteente, ingewerkt hebben. Deze factoren betreffen: de hoogte van de temperatuur, die van de gesteentedruk, de aanwezigheid van water en de grootte van de deformerende krachten.

De indeling van de metamorfe faciës is dus onafhankelijk van de oorspronkelijke samenstelling van de gesteenten. Voor de bepaling van de metamorfe faciës zijn variaties in chemische samenstelling van geen belang, doch uitsluitend de externe omstandigheden. Gezien het feit dat er geen twee gebieden op aarde te vinden zijn, waar een metamorfe gebeurtenis zich op precies dezelfde wijze heeft voltrokken, zou dan ook het aantal metamorfe faciës tot in het oneindige kunnen worden uitgebreid.

Veelal worden een tiental metamorfe faciës gebruikt, deze zijn voornamelijk gebaseerd op de onderverdeling van Eskola (zie afb. 4):

- **Groenschist-faciës**, getypeerd door de mineralen actinoliet, chloriet, epidoot en albiet, waarbij actinoliet wordt gevormd in basische stollingsgesteenten en in mergels. Muscoviet (in phengiet-samenstelling) en biotiet komen voor in kleiïge gesteenten, de biotiet echter alleen in de hoger metamorfe gedeelten van deze faciës; door sommige wordt de groenschist-faciës daarom wel onderverdeeld in een chloriet- en een biotiet-subfaciës.

- **Epidoot-amfiboliet-faciës**, met het typerende mineraal-gezelschap albiet, epidoot en hoornblende (veelal als blauw-groene variëteit); de plagioklaasveldspaat oligoklaas gaat daarbij de plaats van de albiet innemen. Almandien kan in sommige kleiïge en bazaltische gesteenten optreden, doch is niet essentieel voor deze faciës.

- **Amfiboliet-faciës**, min of meer overeenkomende met de eerder genoemde kyaniet- en sillimanietzones, wordt getypeerd door het voorkomen van muscoviet, biotiet, almandien, stauroliet, kyaniet, hoornblende (groene tot bruine) en een intermediaire tot basische plagioklaas (andesien, labradoriet). In de hoge-temperatuur-subfaciës treedt sillimaniet op dat groeit ten koste van de kyaniet, daarnaast verdwijnen stauroliet en een deel van de musco-

viet. In dit hogere deel is kaliveldspaat stabiel.

Gesteenteseries die gemetamorfoseerd zijn in de amfiboliet-faciës komen in een vrij groot gebied in de Penniden van Zwitserland voor. Afb. 5.

- **Granuliet-faciës** (die niet kan worden onderscheiden in het gebied van Barrow), wordt gekenmerkt door het optreden van pyroxeen, zowel in een rhombische als een monokliene vorm, die gegroeid is ten koste van de hoornblende en een gedeelte van de biotiet, welke laatstgenoemde mineralen echter in de lager-temperatuur-subfaciës nog algemeen voorkomen. Daarnaast is een granaat uit de reeks almandien-pyroop algemeen aanwezig, deze wordt gedeeltelijk uit de plagioklaas gevormd. Ook zijn sillimaniet en kaliveldspaat, gedeeltelijk als mikroklien, aanwezig.

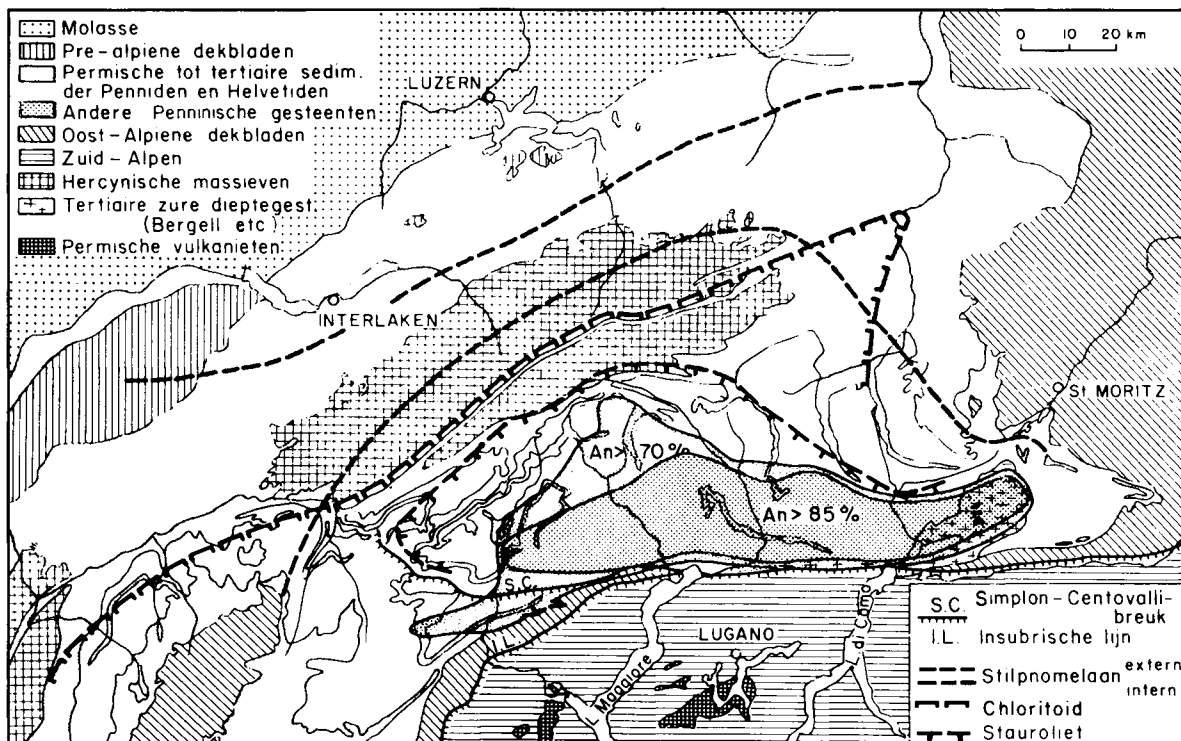
Gesteenten van de granuliet-faciës komen voor in Precambrische gebieden en zijn zeldzaam in jongere gebieden.

In vele gebieden op aarde kan men een opeenvolging vinden van gesteenten die in de verschillende bovengenoemde metamorfe faciës zijn gerekristalliseerd. Zo kan men van gesteenten van de groenschist-faciës via die der epidoot-amfiboliet- en amfiboliet-faciës in de granulieten terecht komen. Deze serie van zogenoemde "progressieve metamorfose", die dus voor een belangrijk gedeelte te danken is aan de verhoging van de temperatuur, vormt een zogenoemde metamorfe faciës-serie. In wezen zal ieder regionaal-metamorf gebied op aarde een eigen karakteristieke metamorfe faciës-serie tonen.

Gevonden is dat er naast de bovengenoemde Metamorfe faciës-serie van Barrow een serie is te onderscheiden waarbij de druk belangrijk hoger is geweest en daarnaast een serie die het resultaat is van een relatief lagere druk.

#### Lage-druk metamorfe faciës-serie

Het type van lage-druk metamorfe faciës-serie wordt gekenmerkt door het optreden van andalusiet in het lager-temperatuurgedeelte, daarna treden achtereenvolgens op: biotiet, cordieriet (dus in plaats van de almandien in de Barrow-serie), stauroliet en tenslotte als typerend mineraal in het hoge-temperatuurgedeelte de sillimaniet. Ook in deze serie worden de aanduidingen groenschist-, epidoot-amfiboliet-, amfiboliet- en granuliet-faciës gebruikt. Deze lage-druk metamorfe faciësserie is, onder meer, beschreven van het Abukuma Plateau in Japan, waar echter naast andalusiet en sillimaniet ook kyaniet voorkomt, hetgeen betekent dat de druk gedurende dit meta-



Afb. 5. Metamorfe zonerings in de Penninische Alpen, Zwitserland, met enkele mineraal-isograden. Het gebied van de amfiboliet-faciës ligt ongeveer binnen de stauroliet-lijn. Naar E. Niggli en E. Wenk.

morfe proces toch een belangrijke factor is geweest. Van enkele plaatsen in de Pyreneeën en rond Aracena in Spanje komen voorbeelden van het Abukuma-type. Hier komt in kalken een mineraalserie voor van, achtereenvolgens: tremoliet — diopsied — forsteriet — grandiet — wollastoniet.

De hoogst metamorfe leden van de lage druk faciës-series worden, onder meer, gevonden in Fins Lapland; hier komen granulieten voor met één pyroxeen, hetgeen wijst op een nog lagere druk dan in het Abukuma type, waarbij deze Finse zeer lage-druk regionaal metamorfe faciës dicht in de buurt komt van de contactmetamorfose. Lage-druk regionale metamorfose is karakteristiek voor grote delen van het Hercynisch gebergte van West-Europa.

#### Hoge-druk metamorfe faciës-serie

De hoge-druk metamorfe faciës-serie wordt gekenmerkt door het optreden van jadeiet, lawsoniet en glaukofaan. Glaukofaan wordt over een veel groter bereik van drukken gevormd dan de andere twee mineralen; ook deze faciës wordt dus wel in tweeën gedeeld met een "typische" hoge-drukserie waarin jadeiet voorkomt en een "atypische" waarin dit mineraal weinig of niet optreedt. Glaukofaan behoort tot de familie der natriumhoudende amfibolen en vormt met crossiet en riebeckiet een doorlopende mengreeks. Typerend voor de groep van de natronamfibolen is dat zij blauw gekleurd zijn. Het gesteente, dat kan lijken op een amfiboolschist, is dan ook van een karakteristieke donkerblauwe kleur. Deze gesteenten worden dan ook wel blauwschisten genoemd. De "blauwschist-faciës", of glaukofaanschist-faciës, is veelal beperkt tot de Mesozoïsche en Tertiaire metamorfe gebieden; in oudere metamorfosen zijn gesteenten van

deze faciës zeldzaam, één der uitzonderingen wordt gevonden in het Hercynicum van Ile de Croix aan de zuidkust van Bretagne. Vooral in de Alpiene plooiingsgordels komt de glaukofaanschist-faciës over grote gebieden voor, vaak geassocieerd met serpentinieten. Bekend zijn voorkomens in de Spaanse Betische Cordillieren en de Franse en Zwitserse Alpen. In de Franse Alpen zijn fraaie voorbeelden te vinden in de serpentinieten langs de Frans-Italiaanse grens; ook de glaukofaangesteenten uit de Penniden van het gebied van Zermatt (Riffelhaus) zijn beroemd.

De glaukofaanschist-faciës gaat bij hogere metamorfose over in de groenschist-faciës of de epidoot-amfiboliet-faciës.

Van de amfiboliet-faciës is geen afzonderlijke hoge-druk subfaciës bekend.

#### Eclogiet

De gesteentenaam eclogiet is gegeven aan een gesteente dat bestaat uit een tweetal mineralen, de grasgroene omphaciet en een rood tot roodbruin gekleurde granaat. Als begeleidende mineralen worden, onder meer, kyaniet, olivijn, amfibool en rutiel gevonden, doch merkwaardigwijls geen plagioklaas. Het ontbreken van het laatstgenoemde mineraal wijst op extreme condities tijdens de metamorfose.

De omphaciet is een monokliene pyroxeen met een samenstelling van een mengkristal van diopsied, hedenbergiet en jadeiet met veelal ook een weinig acmiet. De granaat is er een uit de almandien-pyroop-grossulaarreeks. Eclogiet komt in zijn samenstelling overeen met een gabbro en kan uit gabbro ontstaan volgens de volgende isochemische reactie (dit is een chemische reactie waarbij er geen verandering optreedt in de chemische samenstelling van het gehele systeem): labradoriet + diopsied + olivijn (=gabbro) = omphaciet + granaat + kwarts. Deze herverdeling van de aanwezige chemische bestanddelen geeft als resultaat een veel zwaarder gesteente, het s.g. van eclogiet is rond de 3.5, dat van gabbro 3.0. Dit wijst dus op een transformatie, ofwel een aanpassing aan hoge druk. De **eclogiet-faciës** wordt dan ook beschouwd als de

hoogst metamorfe zone van de hoge-druk regionale metamorfose.

De druk en temperatuur van de granuliet-faciës lopen op tot rond de 13.000 – 15.000 bar en 950 graden Celcius respectievelijk. (1 bar is ongeveer 1 atm.) Voor de eclogiet-zone is een druk van tenminste 17. tot 22.000 bar noodzakelijk bij temperaturen tussen de 900 en 1100 graden Celcius. Dat er bij deze extreem hoge temperaturen en drukken nog metamorfe veranderingen optreden zonder dat het gesteente volledig smelt moet veroorzaakt worden door het geheel of vrijwel ontbreken van water.

Gesteenten die zijn gemetamorfiseerd onder condities van de eclogiet-faciës zijn zeldzaam. Naast de eclogiet zelf bevat deze groep gesteenten als enstatiet, pyroop-olivijn-gesteente, jadeïet en chloromelaniet, allemaal gesteenten met een sterk basische samenstelling. Gesteenten met een andere, meer zure samenstelling zijn in deze faciës niet bekend.

Een bijkomend probleem is dat de gesteenten van de eclogiet-faciës nooit zijn gevonden in een samenhang van een progressieve metamorfe opeenvolging. Altijd betreft het geïsoleerde voorkomens in gesteenten die soms zijn gemetamorfiseerd in de granuliet-faciës, doch ook in, onder meer, de glaukafaanschist-faciës. Dit verschijnsel heeft geleid tot de aanname dat de eclogieten oorspronkelijk afkomstig zijn van de onderkant van een dikke continentale korst of mogelijk uit het bovendeel van de mantel en door tektonische oorzaak, bv. tussen breuken, als een soort van 'vaste intrusie', omhooggeperst werden in de aardkorst. Er zou dus geen relatie zijn tussen de eclogiet en het omringende gesteente. Dit gaat op voor zover het de eclogietvoorkomens betreft, die worden gevonden in bazaltische lava's, kimberliet en peridotiet.

Eclogieten worden gevonden in de gemetamorfoseerde bazaltische kussenlava's (ofiolieten) van de Penniden in Zwitserland; deze lava's zijn echter gedeeltelijk ook gemetamorfiseerd tot glaukafaanschisten. Eclogieten komen, onder meer, ook voor in de peridotietmassieven van het Nordfjordgebied in Noorwegen.

### Lage temperatuur

In vele gebieden op aarde gaan de metamorfe gesteenten van groenschist- en glaukafaanschist-faciës over in niet-metamorfe gesteenten. Toch bevindt zich hier niet de werkelijke ondergrens van de metamorfose. Gesteenten die een regionale metamorfose hebben ondergaan die zwakker was dan die van de twee laatstgenoemde faciës, zijn bekend geworden uit onder meer Nieuw-Zeeland en Japan. In deze terreinen worden een tweetal metamorfe faciës beschreven, één getypeerd door het optreden van prehniet en/of pumpellyiet, de andere door het optreden van bepaalde mineralen uit de zeoliet-groep. Gesteenten, die zijn gemetamorfiseerd in de zeoliet-faciës of de prehniet-pumpellyiet faciës, die ook wel de prehniet-pumpellyiet-metagrauwas-faciës is genoemd, tonen veelal nog hun oorspronkelijke karakter van een sediment of stollingsgesteente. Een duidelijke schistositeit is niet ontwikkeld en rekristallisatie is incompleet. De twee faciës worden wel samengenomen onder: "burial metamorphism" (belastingsmetamorfose).

De **zeoliet-faciës** is gekarakteriseerd door optreden van de zeoliet laumontiet, dat dus wel wordt beschouwd als het eerste mineraal dat bij metamorfose ontstaat. Laumontiet wordt gevonden in de Franse Alpen in het gebied ten oosten van Grenoble.

De **prehniet-pumpellyiet-faciës**, waarin ook het mineraal lawsoniet optreedt, ontstaat onder vergelijkbare lage temperaturen als die der zeoliet-faciës, doch de druk is belangrijk hoger en komt dicht bij die, welke nodig is voor de glaukafaanschist-faciës.

## Types van metamorfose

De verschillende gesteenten die het resultaat zijn van één der bovengenoemde typen van **regionale metamorfose**, hebben gemeen dat in de textuur de invloed zichtbaar is van de gerichte spanningen, die dus ook zorgden voor de deformatie van de gesteenten. Het resultaat is dan een gesteente, waarin de metamorfe mineralen een voorkeur tonen voor een rangschikking volgens één bepaald vlak. Het zal duidelijk zijn dat deze vlakkenstructuur steeds minder duidelijk wordt ontwikkeld bij afnemende spanning; gesteenten die geen invloed van spanning hebben ondergaan en waarin de kristallen alle richtingen uitgroei zijn, behoren tot de **contactmetamorfose**. De rekristallisatie is te danken aan de hitte van een in de aardkorst omhooggedrongen intrusielichaam.

### Hoge temperatuur

De lager-metamorfe zones van de **contactmetamorfose** hebben geen afzonderlijke namen gekregen, hier wordt de term amfiboliet-faciës gebruikt; de mineraalinhoud is veelal gelijk aan die van de lage-druk regionale amfiboliet-faciës.

De gesteenten der hoog-contactmetamorfe **pyroxeen-hoornrots-faciës** zijn gekarakteriseerd door aanwezigheid van ortho- en clinopyroxeen; almandien of pyroop komen in het algemeen niet voor. Voorbeelden van deze faciës worden onder meer in de omgeving van Oslo en Comrie in Schotland gevonden.

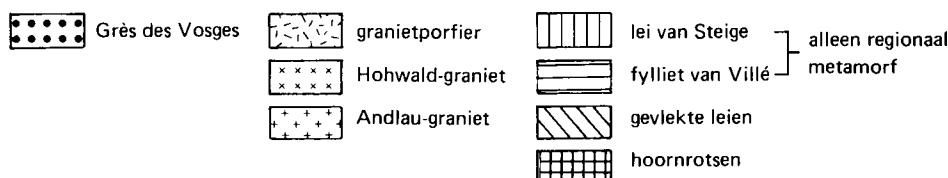
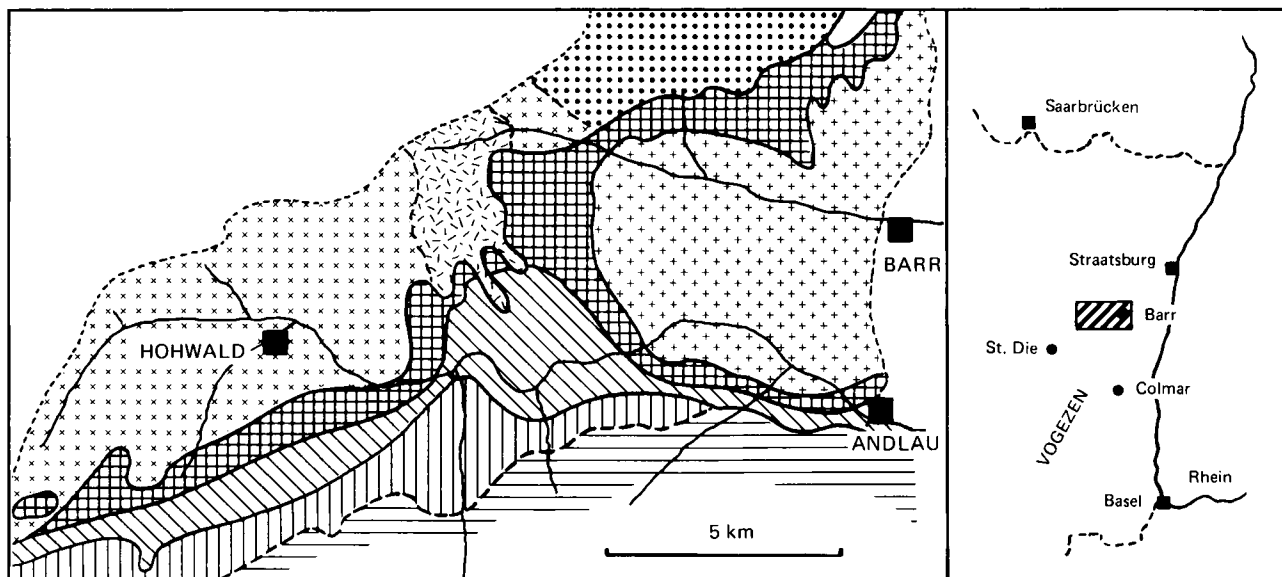
Dat contactmetamorfose niet zo maar één type van rekristallisatie onder een zeer lage druk vertegenwoordigt wordt bewezen door het voorkomen van verschillende mineraalgezelschappen in contactaureolen, waarbij verschillende grootten van de druk duidelijk een rol hebben gespeeld. Zo zijn er contactaureolen met alleen andalusiet als aluminiumsilikaat van de  $Al_2O_3[SiO_4]$ -familie (Oslo), daarnaast aureolen die andalusiet en in de hoger-metamorfe zones sillimaniet bevatten (Arisu, Japan) en zelfs die waarin ook kyaniet voorkomt (Brits Columbia), waar dus de druk een toenemend belangrijke rol heeft gespeeld. Een beroemde contactzone is die van de graniet van Barr-Andlau in de Franse Vogezen, Afb. 6. De buitenste zone bestaat uit gevlekte leien en fyllicten, de vlekken bestonden waarschijnlijk uit cordieriet doch zijn nu volledig omgezet in kwarts, glimmer en hematiet. Dichter naar het intrusielichaam toe gaande volgt een zone van hoornrots met andalusiet- en cordieriet-porfyroblasten met verder biotiet, veldspaat en toermalijn.

De contactzone van de bekende Skiddaw-graniet in het Engelse Merendistrict laat gevlekte leien zien in de buitenste regionen, welke vlekken bestaan uit chloritoid en andalusiet; de volgende zone bestaat uit biotiet-muskoviet-cordieriet-andalusiet-schisten en hoornrots.

Een vergelijkbaar contactaureool heeft de Flamanville-graniet in Normandië. (Zie Gea, vol. 14, nr. 1).

Bij metamorfose onder nog hogere temperaturen wordt nog de **sanidinit-faciës** onderscheiden, veelal beperkt tot insluitels in lava's en behorend tot de **pyrometamorfose**. Karakteristieke mineralen zijn onder meer: sanidien, anorthoklaas, mulliet, tridymiet, cristobaliet, alsmede monticelliet en meliliet naast tilleyiet en spurriet, welke laatste vier mineralen door sommigen wel als indexmineralen voor een onderverdeling van de sanidinit-faciës worden gebruikt. Daarnaast treedt vaak smelten op en glas komt regelmatig voor.

Voorkomens van gesteenten van de sanidinit-faciës worden o.a. gevonden in de Eifel in de insluitels in de bims- en andere aslagen; andere bekende voorbeelden zijn de gabbro van Sthean Sluaigh in Argyll in Schotland met als pyrometamorfe producten mulliet, spinel, pseudo-brookiet, korund, sanidien en diopsied.



Afb. 6. Het contactmetamorphe aureool van de granieten van Barr-Andlau, Noord-Vogezen. (Naar J.P. von Eller, 1970)

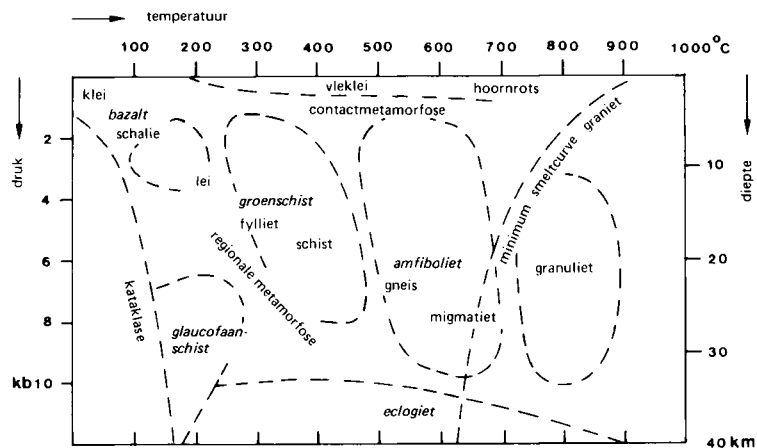
Tabel I. Metamorphe faciës en hun mineralen

| Faciësnaam           | Mineraalgezelschap in basisch stollingsgesteente     | Mineraalgezelschap in kleiïge gesteenten                            |
|----------------------|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| groenschist          | chloriet, actinoliet, albiet, epidoot                | chloriet, muskoviet, chloritoid, kwarts                             |
| epidoot-amfiboliet   | hoornblende (blauw-groen) epidoot, albiet, almandien | almandien, chloriet, muskoviet, biotiet, kwarts                     |
| amfiboliet           | hoornblende (bruin), andesien-labradoriet, granaat   | granaat, biotiet, muskoviet, sillimaniet/kyaniet-stauroliet, kwarts |
| pyroxeen-hoornrots   | clinopyroxeen, labradoriet                           | cordieriet, andalusiet, biotiet, kwarts                             |
| granuliet            | clinopyroxeen, labradoriet, orthopyroxeen            | granaat, cordieriet, biotiet, sillimaniet, kwarts                   |
| sanidiniët           | clinopyroxeen, labradoriet                           | sanidien, sillimaniet, hyperstheen, cordieriet, kwarts              |
| glaukafaanschist     | glaukofaan, lawsoniet                                | muskoviet, chloriet, spessartien, kwarts                            |
| eclogiet             | pyroop, omphaciet                                    | —                                                                   |
| zeoliet              | smectiet, zeolieten                                  | illiet, chloriet, kwarts                                            |
| prehniet-pumpellyiet | prehniet, pumpellyiet                                | illiet, stilpnomelaan, chloriet, kwarts                             |

Afb. 7. Enkele metamorfe gesteentetypen en hun relatie tot de druk en temperatuur waaraan ze tijdens hun vorming werden blootgesteld.

Kleine letters: van klei tot migmatiet.

Cursief: van bazalt tot eclogiet.



### Beweging langs breuken

Dan rest nog als laatste proces van gesteenteverandering de **cataclastische metamorfose**, ook wel cataclase genoemd, waarbij gesteenten worden verbroken en vernalen in een bewegingszone, zoals in een breuk- of schuifvlak. Het proces vindt plaats bij lage temperatuur en rekristallisatie is een ondergeschikte factor. Het proces is van belang omdat grote breuken gewoonlijk vergezeld zijn van een breukzone die soms verscheidene kilometers breed kan zijn.

Gesteenten die worden onderworpen aan cataclase onder condities die dicht bij het aardoppervlak heersen, veranderen in breccies of, bij vèrgaande vernaling, in breukmeel of breukklei. Deze gesteenten zijn vaak incoherent, bestaan dus gedeeltelijk uit los materiaal, de hoekige stukken gesteente liggen ingebed in een matrix van zeer fijn materiaal. Dat deze gesteenten gemakkelijk kunnen verwerken en door de erosie weggespoeld kunnen worden zal duidelijk zijn.

Vaste, coherente gesteenten die een duidelijke laminaire (fijngebande) structuur tonen, heten **mylonieten**. Voorbeelden zijn myloniet-gneis en blastomyloniet. Deze laatste gesteentenaam geeft aan dat er grotere kristallen in de glasachtige, gebande grondmassa liggen, hetzij als resten van gekraakte kristallen, hetzij als metamorfe nieuwvormingen; de gevormde mineralen behoren tot die van de groenschist-faciës.

Bij extreme vormen van vernaling van mylonieten treedt een gedeeltelijk smelten op door de hitte van de wrijvende beweging. Het gesteente, dat veelal groenig gekleurde, glasachtige lagen bevat, heet pseudo-tachylit.

Merkwaardig is, dat bij het vergruizen of vernalen van een gesteente de kwarts als een der eerste mineralen uit elkaar wordt getrokken en vergruisd; bij verdergaande vergruizing worden ook glimmers tot zeer kleine plaatjes vernalen; de veldspaat blijft lang bewaard en wordt soms als porfiroclasten gevonden, omringd door een dunne rand van kleine kwartsfragmentjes.

Rekristallisatie komt in de myloniet regelmatig voor, de nieuwgevormde mineralen zijn kwarts en chloriet.

Een der zeer imposante breuken in de aardkorst is de San Andreasbreuk in Californië. De breuk kan over 100 km worden vervolgd en loopt in een ZZO-NNW-richting. Het gedeelte van de aardkorst dat zich aan de westkant van de breuk bevindt, beweegt zich in noordelijke richting ten opzichte van de gesteenten ten oosten van de breuk; de afstand die langs de breuk werd afgelegd is tenminste 550 km.

De breuk bestaat uit een kilometers brede zone van cataclastische gesteenten die door een groot aantal vrijwel evenwijdige breuken wordt doorzet. Aardbevingen van

geringe sterkte komen vrijwel dagelijks op vele plaatsen langs de gehele breukzone voor. De laatste zware aardbeving was die van 1906 die San Francisco voor een groot gedeelte verwoestte. De gesteenten in de breukzone bestaan uit breccies waarin fragmenten van een groot aantal verschillende gesteenten aanwezig zijn, die liggen in een mylonietische matrix. De myloniet toont een goed ontwikkelde banding, die evenwijdig is aan de algemene richting van de breuk.

### Metamorfe gesteenten en mineralen

Door de grote verscheidenheid in chemische samenstelling en temperatuur- en drukcondities bij de mineraal- en gesteentevorming bestaat er een grote variatie in metamorfe gesteenten en hun mineralen. In Tabel I is weergegeven, welke mineralen of mineraalgezelschappen in één bepaalde faciës kunnen worden verwacht, afhankelijk van het uitgangsgesteente. Voor de tabel zijn de veel voorkomende mineraalassociaties voor basische stollingsgesteenten (bazalten) en kleiïge gesteenten gekozen.

Vele metamorfe gesteenten kunnen aan de hand van de in dit artikel beschreven criteria worden ingedeeld. De in afb. 3 en 4 afgebeelde P/T-diagrammen kunnen in combinatie met de tabel gebruikt worden om grofweg aan te geven welke plaats de gesteenten in het systeem innemen. Zie ook afb. 7.

In een volgend artikel komen we nader op de metamorfe gesteenten en hun mineralen terug.

### Literatuur

Bij dit artikel kunnen de volgende boekwerken worden geraadpleegd:

- R. Mason: Petrology of the Metamorphic Rocks. Textbook of Petrology, Vol. 3. Allen & Unwin, London, 1978 (een plezierig leesbaar boek).
- Rutley's Elements of Mineralogy. Murby & Co., London, 1974 (een goede inleiding in de mineralogie).
- A. Miyashiro: Metamorphism and Metamorphic Belts. Allen & Unwin, London, 1979.
- H.G.F. Winkler: Petrogenesis of Metamorphic Rocks. Springer, New York, 1979.
- F.J. Turner & J. Verhoogen: Igneous and Metamorphic Petrology. McGraw-Hill, New York, 1960 (voor diegene die alles wat er in dit Gea-nummer staat al weet).