

Inhoud:

Metamorfose der Alpen	65	Boekbesprekingen	88
De secundaire koper- en loodmineralen van Cap Garonne (Var, Z-Frankrijk)	71	Oliveniet en mixiet	88
Een nieuw mineraal, maar wat nu	77	Nogmaals Carbonaten	naast pag. 88
Diatomeeën in kustafzettingen: kiezelalgen als gidsen voor paleomilieu en zeeniveau	80	Nogmaals Blaton	naast pag. 88
		Mutaties in het GEA bestuur	naast pag. 88

Metamorfose der Alpen

door Drs. W.C.P. de Vries

Inleiding

De Alpiene gebergtegordel van Europa bevindt zich aan de zuidzijde van het uitgestrekte Middeneuropese gebied dat opgebouwd is uit Hercynische, ofwel Variscische, gebergtegebieden. Grote gedeelten van de Alpen werden daarbij gevormd op het vlakgeërodeerde Hercynische gebergte; de gesteenten van deze Hercynische ondergrond werden meegenomen in de Alpiene plooingsbewegingen en maken nu deel uit van de Alpiene structuren.

Het Hercynische gebergte beslaat een zeer breed gebied, van Zuid-Engeland tot Zuid-Spanje. De Alpengordel is beduidend smaller dan het Hercynische gebergte; dat de Alpen zich over grote oppervlakten uitstrekken is te danken aan het slingerend verloop van de smalle Alpenketens (zie afb. 1).

De opbouw van het Alpengebirge is zeer complex door het voorkomen van vele, soms over grote afstanden overschoven gesteentemassa's en dekbladcomplexen. In vele gebieden komen metamorfe gesteenten voor waarin progressieve metamorfe series aanwezig zijn; er kunnen series van verschillende typen van metamorfose worden onderscheiden.

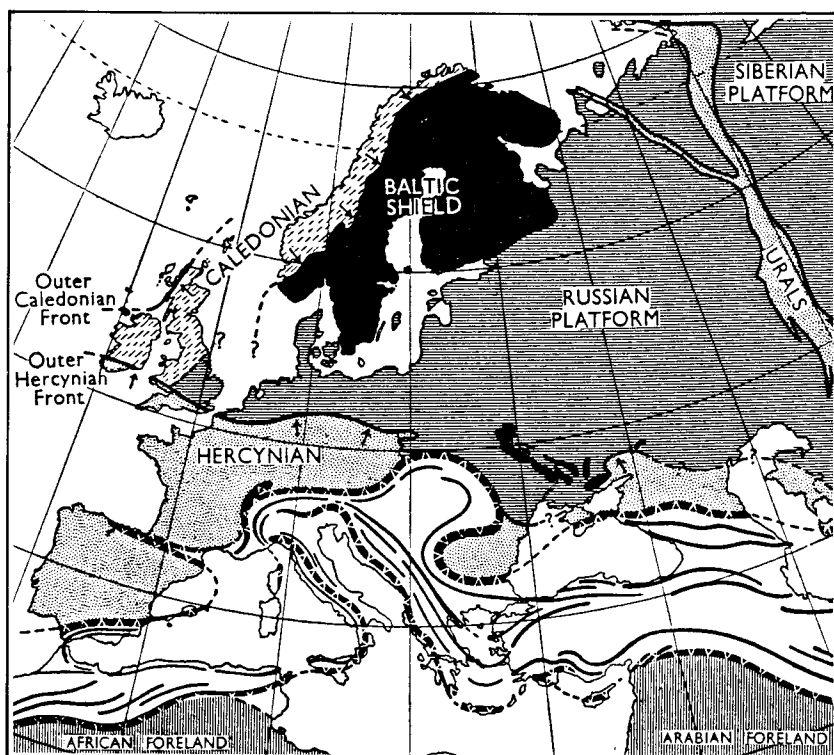
Het Alpengebirge is, geologisch gezien, kort geleden gevormd en de erosie heeft nog niet de tijd gehad om het gebergte af te breken tot aan de diepere gedeelten van de gebergtegordel, zoals dit gebeurd is met de Hercyniden of met de nog oudere Caledoniden. In de Alpen zijn dan ook de hogere gedeelten van het gebergte nog aanwezig. Hierin komen vele gesteenteseries voor die tijdens de gebergtevorming niet werden gemetamorfoseerd, omdat deze gesteenten slechts door een dunne laag bovenliggende gesteenten bedekt waren en de hogere drukken en temperaturen die noodzakelijk zijn voor het in gang zetten van metamorfe reacties er niet werden bereikt.

In de Alpen zijn er dus gebieden waar de overgang van niet-metamorfe naar metamorfe gesteenten kan worden bestudeerd; het grote reliëf in de Alpen helpt daarbij om

de isograden van de verschillende metamorfe zones tot in details te kunnen vaststellen.

Het noordelijk gedeelte van de Centrale of Zwitserse Alpen wordt ingenomen door de Helvetische eenheden, die zijn opgebouwd uit kleiige en kalkige gesteenten van Mesozoïsche en Kenozoïsche ouderdom. De Helvetische eenheden liggen discordant op een complex van Paleozoïsche gesteenten, die als resultaat van een eerdere fase van deformatie (de Hercynische orogenese) sterk gemetamorfoseerd zijn en doorzet met granitische gesteenten. Deze Paleozoïsche kristallijne massieven zijn bedekt door sedimentaire gesteenten van Postpaleozoïsche ouderdom, die nog op hun oorspronkelijke plaats van sedimentatie liggen en die **autochtone** gesteenteseries worden genoemd. Op deze autochtone gesteenten en onder het schuifvlak waarover de Helvetische dekbladen zich hebben voortbewogen liggen dunne pakketten van gesteenten die slechts weinig werden verplaatst ten opzichte van hun oorspronkelijke sedimentaire positie, de **paraautochtone** eenheden. Gaande van de hogere gedeelten van de Helvetische dekbladstapel naar beneden in de gesteenteopvolging, dus naar het kristallijne massief, bv. het Aarmassief, ziet men in de laagste gedeelten van de sedimentaire serie metamorfose optreden. Carbonaatgesteenten (kalken en dolomieten) zijn door deze beginnende metamorfose niet veranderd in hun mineraalsamenstelling. De pelitische (kleiige tot siltige) sedimenten tonen fraai de beginnende metamorfose door veranderingen in de mineraalinhoud en door texturele veranderingen. De pelieten zijn veranderd in leien, die op een aantal plaatsen voor daklei worden ontgonnen (Sernftal, Glarus). De beschrijving van de eerste uitingen van deze metamorfose, die vergelijkbaar is met het Barrow-type, is gedaan in het artikel: **Metamorfose** (Gea 1984, nr. 2).

Van groot belang is, dat de isograden (de lijnen of vlakken die de begrenzing vormen van het optreden, dus van de



Afb. 1. Tektonische kaart van Europa. De Alpiene gebergtekets zijn aangegeven door dikke zwarte lijnen met witte pijlen die de plooi-richting vertegenwoordigen. Naar A. Holmes.

eerste vorming, van een bepaald metamorf mineraal) zich niet houden aan de tektonische grenzen, dus aan de grenzen van respectievelijk: (1) Aarmassief met zijn autochtone sedimentbedekking, (2) parautochtoon, (3) verschillende Helvetische dekbladen. De isograden lopen wel ruwweg evenwijdig aan het oppervlak van het kristallijne Aarmassief, doch daarnaast dwars door de tektonische grenzen van de op het Aarmassief liggende gesteentecomplexen. Zie afb. 2.

Boven de stilpnomelaan-isograad geeft de verhouding tussen een metamorf gevormd, muscovietachtig fyllosilicaat (veelal een magnesiumrijke sericiet-variëteit die phengiet wordt genoemd) en het kleimineraal illiet ook nog een aantal isograden aan. Deze isograden van zeer lage metamorfose worden aangeduid met de term illiet-kristalliniteit. Zij lopen, zoals blijkt uit afb. 3, dwars door de contacten tussen de Helvetische eenheden heen, hetgeen bewijst dat de dekbladen op hun huidige posities waren aangekomen alvorens de metamorfe processen inzetten.

Alpiene metamorfe geschiedenis

Vele Alpien metamorfe gesteenten in de Betische Cordilleren in Zuid-Spanje, Corsica, de Balkanlanden en de Zwitserse, Franse en Oostenrijkse Alpen werden onderworpen aan een fase van regionale metamorfose die zich heeft voltrokken onder relatief hoge druk en lage temperatuur. De gesteenten zijn veelal gerekrystalliseerd in de glaukofaan-schist- en groenschist-facië. Daarnaast komen in de Zwitserse en Franse Alpen gesteenten voor die werden gemetamorfoseerd in de laaggradige prehniet-pumpellyiet-facië, waardoor bv. in het gebied ten oosten van Grenoble naast pumpellyiet ook laumontiet wordt gevonden. Deze tweede fase van metamorfose, die zich heeft voltrokken

bij een belangrijk lagere druk, behoort ook tot de Alpiene metamorfose, doch is van jongere datum. In de centrale Zwitserse Alpen heeft tijdens deze tweede fase een belangrijke stijging van de temperatuur plaatsgevonden en werden de gesteenten in het Penninisch domein in de Lepontische Alpen gemetamorfoseerd tot in de amfiboliet-facië met de vorming van, onder meer, sillimaniet en stauroliet (zie afb. 2).

West-Alpen

In de westelijke Alpen, waarmede veelal de Frans-Italiaanse Alpen met de naburige gebieden in Zuidwest-Zwitserland worden aangeduid, wordt een drietal verschillende typen van metamorfose gevonden die het resultaat zijn van verschillende fasen van metamorfose. Deze fasen kunnen weer gekoppeld worden aan de verschillende stadia van de ontwikkeling van het Alpiene orogeen.

De eerste fase heeft een mineraalgezelschap geproduceerd dat karakteristiek is voor omstandigheden van relatief hoge druk en lage temperatuur met als mineralen glaukofaan, jadeiet, lawsoniet, kyaniet en het gesteente eclogiet. De tweede fase is vertegenwoordigd door een metamorfose van het lage- tot intermediaire druktype; veelal is de rekristallisatie beperkt gebleven tot de groenschist-facië, zoals in de gebieden ten zuiden van de Monte Rosa; in de Lepontische Alpen werd echter de amfiboliet-facië bereikt. Een derde, in een nog later stadium gevormde mineraalparagenese wordt voornamelijk getypeerd door zeolieten en komt alleen voor in de externe gedeelten van de westelijke Alpenboog.

Karakteristieke mineralen voor de eerste fase, de hogedruk-lagetemperatuur-metamorfose, zijn de natrium-amfibolen, die in groten getale voorkomen in de Piemont-zone, in de Sesia-Lanzo-zone, in de Briançonnais, in delen van het Monte Rosa-Gran Paradiso-Dora Maira-gebied en in de "Gruppo di Voltri" in de Ligurische Alpen nabij Genua. In de meer externe delen van het gebergte komt voornamelijk crossiet voor; de natrium-amfibool die in veel grotere hoeveelheden optreedt in de meer interne gedeel-

ten is glaukofaan. De hogedruk-lagetemperatuur-metamorfose wordt naar dit donkerblauwe mineraal ook "blauw-schistfaciës" genoemd.

Van belang is het voorkomen van grote jadeiet-profiroblasten in de interne Briançonnais-zone (Ambin, Acceglio, Vanoise).

De tweede fase van metamorfose heeft gezelschappen van mineralen geproduceerd die tot de groenschist-faciës behoren. In de westelijke Alpen heeft deze tweede fase de resultaten van de eerste, hogedruk-fase in vele gebieden volledig uitgewist. Deze tweede fase is niet beperkt tot de Penniden, doch wordt ook gevonden in het Helvetische gebied en in de Austroalpiene eenheden. Hoe verder men afdaald naar de diepere, meer interne gedeelten van de Alpen, hoe sterker deze fase van metamorfose de gesteenten heeft beïnvloed, dit op overeenkomstige wijze als de eerste, hogedruk-fase. In het gebied van Ticino in de Zwitsers-Italiaanse Alpen, heeft de metamorfose de sterkte bereikt van de amfiboliet-faciës, zoals we reeds eerder opmerkten.

Een typerend mineraal voor de tweede fase is albiet, dat voorkomt in schisten, gneizen en marmers; karakteristiek zijn de grote albiet-porfiroblasten die gegroeid zijn in fylliet.

Als laatste fase in de metamorfe geschiedenis van de westelijke Alpen treedt een mineraalgezelschap op van de zeolietfaciës, gekarakteriseerd door heulandiet, laumontiet, prehniet en pumpellyiet. Voorbeelden in het gebied ten westen van de Mont Blanc en ten zuiden van de Pelvoux zijn gesteenten van Eocene ouderdom, die lagen van grauwacken bevatten waarin veel vulkanische detritus voorkomt (de zogenoemde Tavayanne-zandsteen), alsmede basische gesteenten van het Aiguilles Rouges-massief en langs de Sestri-Voltaggio-breuk in de meest interne delen der westelijke Alpen. In de kristallijne massieven van de Dauphiné komen aders en holruimten voor met pumpellyiet, prehniet, heulandiet en laumontiet.

De westelijke begrenzing van deze metamorfose loopt langs de westgrens van de kristallijne massieven van de

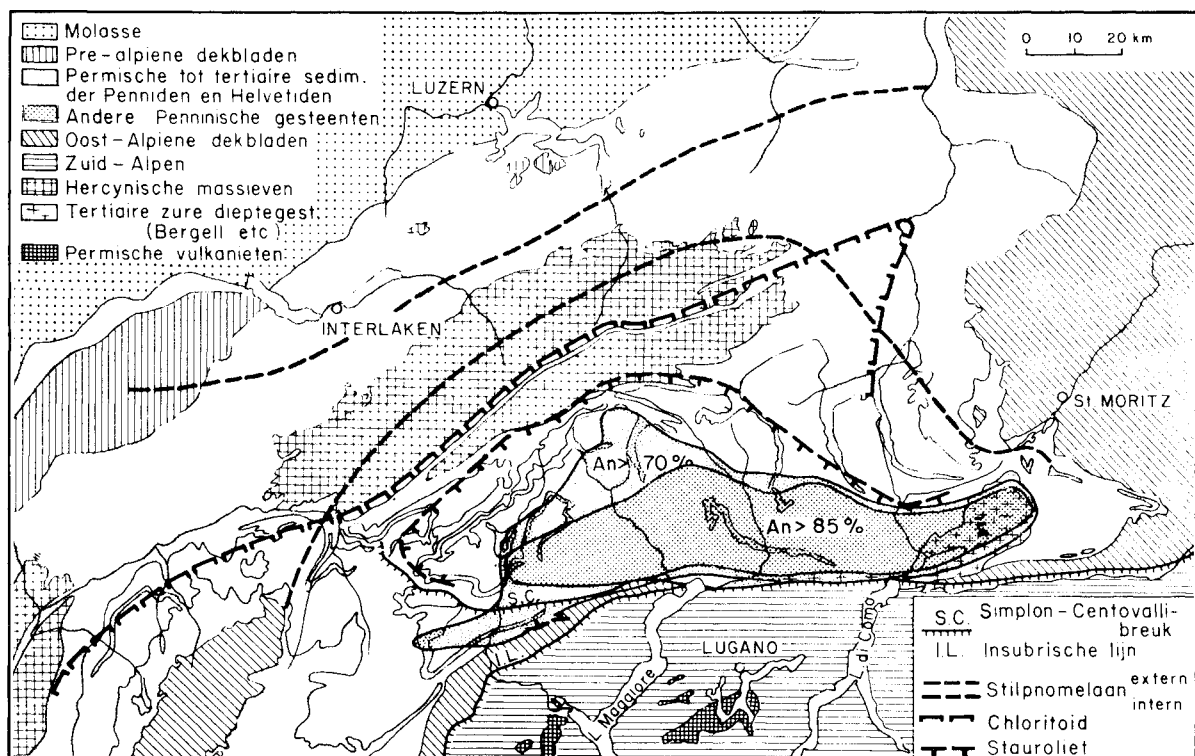
Dauphiné. Ook het dekblad van de Helminthoiden-flysch, tussen de Pelvoux en de Argentera, is beïnvloed.

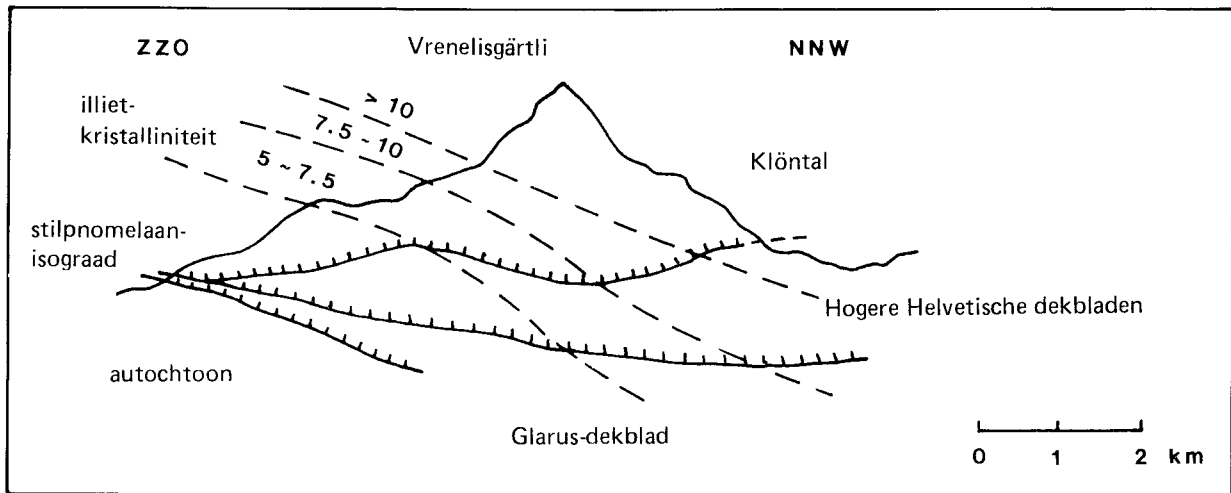
Centrale Alpen

In de Zwitserse Centrale Alpen heeft zich de metamorfe geschiedenis op vergelijkbare wijze afgespeeld. Sporen van de eerste hogedruk-fase worden nog gevonden in de Grisoniden, waar in de noordelijke gedeelten van het Adula- en Tambo-dekblad, onder meer, glaukofaan en crossiet voorkomen (bekend is het voorkomen van glaukofaan van Oberhalbstein). Veelal is het resultaat van deze eerste fase echter grotendeels uitgewist door de tweede fase; die van intermediaire druk-metamorfose. Zo komen in het noordelijk gedeelte van het Adula-dekblad glaukofaankristallen voor die een rand hebben van een blauw-groene amfibool en daaromheen een rand van actinoliet. De tweede fase wordt aangeduid als de Lepontische fase; deze vertegenwoordigt de klassieke metamorfe gebeurtenis der Centrale Alpen. Zie afb. 2.

De laagste zone, de stilpnomelaan-zone, treedt onder meer op in de Helvetiden en het noordelijk gedeelte van het Aar-massief. Naar het zuiden gaande volgt de granaat-zone met optreden van een almandien-spessartien-grossulaar-granaat in het Aar- en Gotthard-massief. Het voorkomen van chloritoid is beperkt tot de Mesozoïsche pelieten en mergels van het Gotthard-massief; dit is geen begrenzing van een metamorfe zone, doch een gevolg van het feit dat gesteenten met een voor de vorming van chloritoid nood-

Afb. 2. Metamorfe zonerings in de Penninische Alpen, Zwitserland, met enkele mineraalisograden. Het gebied van de amfibolietfaciës ligt ongeveer binnen de stauroliet-lijn. An > 70% en An > 85% duiden op het anorthiet-(calcium-)gehalte in plagioklaas; de stijging hiervan houdt verband met de metamorfosetemperatuur, die oploopt in Z-richting en ten N van de Insubrische Lijn (I.L.) een maximum bereikt. Naar E. Niggli en E. Wenk.





afb. 3. Isograden van beginnende metamorfose. Profiel door het Aarmassief met zijn autochtone bedekking en het Helvetische complex langs de westzijde van het dal van de Linth ten zuidwesten van Glarus, Glarner Alpen.

zakelijke chemische samenstelling in de gebieden in de omgeving niet beschikbaar waren.

De kyaniet-zone, die vrijwel overeenkomt met het verspreidingsgebied van stauroliet, heeft zijn noordgrens langs het Gotthard-massief en strekt zich uit tot aan de Simplon-Centovalli-breuk en de Insubrische Lijn tot nabij het Bergell-massief. Dit is dan het gebied van de amfioliet-faciës.

Langs de Insubrische Lijn, van de Bergell tot rond 20 km ten westen van Locarno komt de hoogste metamorfose voor en wel de sillimaniet-zone; bekend zijn de prismatische sillimanietkristallen uit het dal van de Mera nabij de Bergell.

De tweede fase, die van intermediaire druk, gaat in de richting van het Bergeller massief over in een lagedruk-metamorfose, die aldaar het karakter krijgt van contact-metamorfose. Rond 10 km ten westen van de Bergell worden stauroliet en kyaniet zeldzamer en treden nu cordiëriet, andalusiet en wollastoniet op. Bekend is het voorkomen in Val Codera van sapphirien in gezelschap van orthopyroxeen, sillimaniet en cordiëriet.

De oorzaak van dit type van metamorfose is de intrusie van de Bergeller granodioriet en tonaliet, die na afloop van het hoogtepunt van de Lepontische fase in de gesteenteseries van de hogere Penniden en de Oostalpiene dekbladen is binnengedrongen.

Van de derde fase van regionale metamorfose zijn de sporen gevonden in de Savoie in de westelijke Alpen en ook in het Glarus-gebergte. Ook hier zijn de metamorfe effecten gebaseerd op de illiet-phengiet-kristalliniteit. Daarnaast komen chloriet en pyrophylliet voor in schalies en leien; chloriet en stilpnomelaan worden gevormd in carbonaatgesteenten.

Metamorfose der ofiolieten

Voor het vaststellen van de effecten en het verloop van de metamorfe processen wordt in het bijzonder gebruik gemaakt van gesteenten die belangrijke veranderingen

tonen tijdens een proces van metamorfose. Deze veranderingen moeten snel en duidelijk merkbaar zijn bij een geringe variatie in de omstandigheden tijdens de metamorfose.

Gesteenten die snelle en duidelijk merkbare veranderingen tonen zijn bv. kleigige gesteenten en basische gesteenten in de vorm van lava's, dieptegesteenten of vulkanische gruislagen (pyroklastica of tefra); vooral de in de Franse en Zwitserse Alpen voorkomende ofiolieten zijn in dit opzicht van groot belang.

Met ofiolieten worden massa's van basische tot ultrabasische gesteenten bedoeld, die onder meer kussenlava's, gabbro's en serpentiniëten omvatten. De ofiolieten komen voor in Jurassische en Cretaceïsche gesteenten zoals de Bündnerschiefer (schistes lustrés); de precieze samenhang is veelal niet duidelijk daar stratigrafische contacten vaak ontbreken.

Alle ofiolietvoorkomens in de Alpen zijn gemetamorfoseerd. Een plezierige omstandigheid is dat er in de ofiolieten vele stadia van zeer lage tot hoge graad van metamorfose worden gevonden zoals van de prehniet-pumpellyiet-faciës, de pumpellyiet-actinoliet-chloriet-faciës, de groenschist- en blauwschist-faciës, alsmede de eclogiet-faciës. Afb. 4.

In het Penninisch gebied komen ofiolieten voor in de Valais. Deze ofiolieten zijn in het algemeen beperkt tot kleine, sterk getektoniseerde voorkomens in de vorm van serpentiniëten (Binn, Hohsandhorn, Vals, Safien, Tambo, Avers). Daarnaast bevat de Piemont-zone een grote verscheidenheid aan ofiolieten. In Zwitserland komen laagmetamorfe complexen voor in de Iberg-eenheid, het Arosa-gebied, Platta-dekblad (Oost-Zwitserland, Liechtenstein, Allgäu), in Frankrijk in het gebied van Montgenève en Queyras, alsmede in de Pré-Alpen en de Helminthoidenfylsch.

In de interne zone van de Zwitsers-Italiaanse Alpen vinden we de hoogmetamorfe eclogieten en kinzingieten van de Sezia-Lanzo-zone, de Mont Emilius, de Ivrea-zone en het Dent Blanche-dekblad.

Daarnaast vinden we andersoortige basische vulkanieten als de spilitische melafier in de Verrucano van Zwitserland en de spiliëtbazalten van de Pelvoux en de Dôme de Remollon van de Franse Alpen.

Een aantal voorkomens van ofiolieten worden gevonden in:

- de Pré-Alpes Romandes, waar een groot aantal kleine voorkomens optreedt van spilitische bazalt (kussenlava's) en diabazen. Deze gesteenten zijn zeer laagmetamorfe;
- de Chablais van Haute-Savoie, waar ontsluitingen

worden gevonden in het Col des Gets-gebied; de gesteenten zijn diabazen, kussenlava's, gabbro's (La Mouille-Ronde) en serpentinieten (lizardiet-chrysotiel-serpentin); – het gebied tussen het Mont Blanc-massief en de Kleine Sint Bernhardpas. Hier liggen de ofiolieten van de Versoyen-zone. De tektonische positie is niet duidelijk, er wordt aan een relatie met het Brèche de Tarentaise-dekblad of het Dent Blanche-dekblad gedacht.

Kussenlava's worden onder meer gevonden bij Chalets de Prainan ten noorden van Bourg-St.-Maurice; massieve groenstenen in het Beaupré-Mont Miravidi-gebied; gesteenten die rijk zijn aan glaukofaan en stilpnomelaan komen voor op de Pointe du Clapey, hier worden onder meer grofkristallijne glaukofanieten gevonden. De gesteenten zijn gemetamorfoseerd in de groenschist- en de blauwschist-faciës.

– De grootste massa van laagmetamorfe ofioliet is die van Montgenèvre langs de Frans-Italiaanse grens ter hoogte van Briançon in het Bousson-dal, het brongebied van de Durance.

Het ofiolietcomplex is begrensd door breuken en daarbij aan de oostzijde overschoven door de schistes lustrés. Kussenlava's vormen een belangrijk gedeelte van de gesteenten, daarnaast komen grofkristallijne gabbro's voor (bv. op de zuidwestzijde van de Chenaillet en tussen Sagna Longa en Colle Bercia); interessant is de grote verscheidenheid aan insluitels in de serpentinieten, zoals de albitiet van de Replatte du Gondran (gaande in de richting van de Chenaillet).

Magnifieke gesteenten zijn de "variolites de la Durance", die voorkomen in het Chenaillet-massief. De variolieten zijn kussenlava's, waarvan de kussenstructuur op veel plaatsen prachtig bewaard is. Het gesteente heeft zijn

naam te danken aan de kogelronde, lichtgekleurde, radiaalstralige aggregaten van uit de glasachtige lava gekristalliseerde mineralen, veelal plagioklaas. De sferulieten hebben vaak de afmeting van erwten, op enkele plaatsen zijn zij 2 tot 3 cm in doorsnede. Deze variolen komen voor in een vrij smalle zone van enkele centimeters tot decimeters dikte, die op enkele centimeters onder de korst van de lava voorkomt.

– In de Rhaetische Alpen in het zuidoosten van Zwitserland, het gebied van Arosa en het Boven-Engadin, komen grote massa's ofiolieten voor die het Bovenpenninische Platta-dekblad vormen, de hoogste Penninische eenheid in dit gebied. Op de Platta-eenheid liggen de grote Oostalpiene dekbladen, deze bevatten geen ofiolieten (zie ook Gea 1984, nr. 2, artikel "Metamorfose").

De Platta-ofiolieten bevatten kussenlava's van tholeïet-bazalt-samenstelling, diabazen, diallaag-gabbro's, Iherzolitische serpentinieten en geassocieerde oficalcieten. Deze laatstgenoemde gesteenten bestaan uit een vaak laagsgewijze afwisseling van serpentin en calciet.

Het bovengenoemde gesteentegezelschap, dat ook radiolariet- en vuursteenlagen van Boven-Jura-ouderdom, leien en fyllieten uit het Onder-Krijt, alsmede kalken bevat, is typerend voor een oceanische korst. Deze oceaan was in de Alpiene geosynclinale aanwezig tijdens Jura en Onder-Krijt.

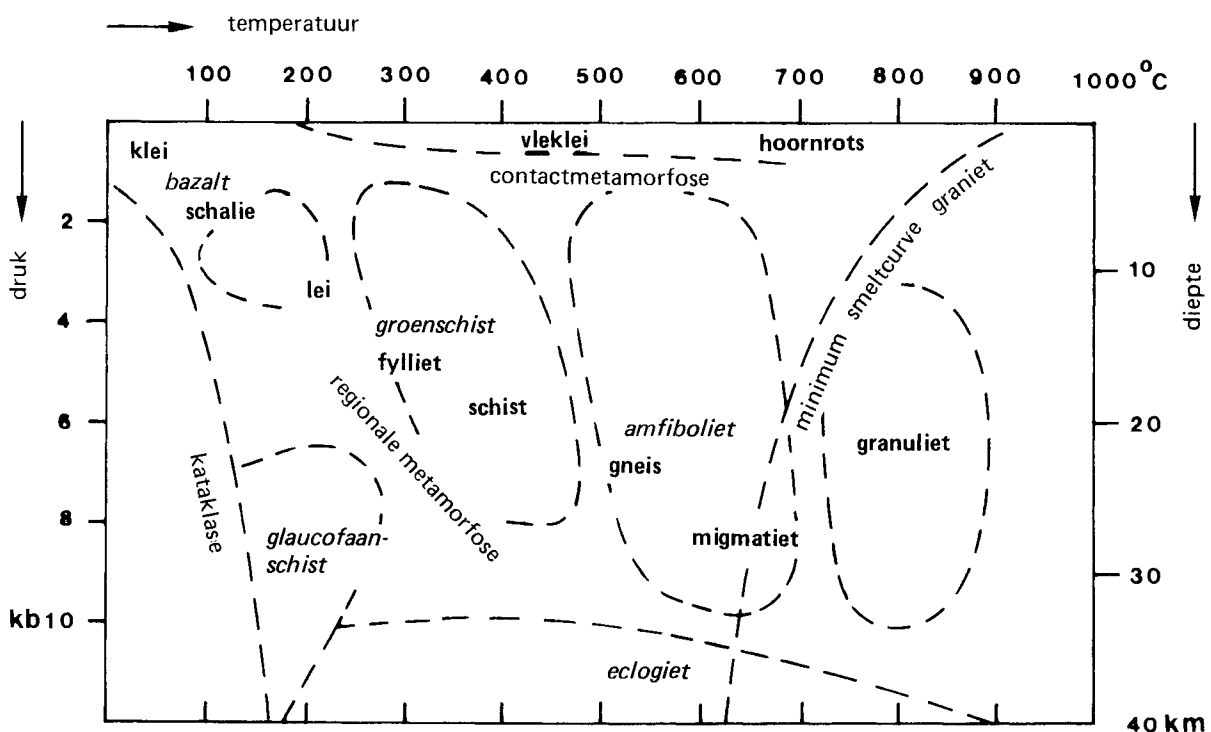
De tektonische deformatie en ook de graad van metamorfose van de gesteenten neemt toe van noord naar zuid. Zo kunnen in het gebied van Arosa nog kussenlavastructuren worden gezien, in het St.-Moritz-gebied zijn de gesteenten sterk geserpentiniseerd.

Pumpellyiet treedt op in de gesteenten van het Arosa- en Platta-gebied; in het St.-Moritz- en Avers-gebied is geen pumpellyiet aanwezig en treedt hiervoor in de plaats glaukofaan en ook lawsoniet op.

De eclogieten werden gevormd door metamorfose der ofiolieten en komen voor in de kristallijne complexen van de Monte Rosa, Gran Paradiso, Dora Maira en in de Sesia-Lanzo-zone.

Na deze eerste fase van hogedruk-metamorfose volgt de periode van metamorfose onder lage tot intermediaire

Afb. 4. Enkele metamorfe gesteentetypen en hun relatie tot de druk en temperatuur waaraan ze tijdens hun vorming werden blootgesteld.
vette letters: de serie van klei tot migmatiet/granuliet en klei tot hoornrots;
cursief: van bazalt tot eclogiet



druk, voornamelijk in de groenschist-faciës. Karakteristieke resultaten van deze fase van metamorfose zijn de "prasiniet" en "ovardiet", variëteiten van albiet-epidootschisten gevormd uit de basische stollingsgesteenten. De tijdens de eerste fase gevormde eclogieten zijn door de tweede fase van metamorfose soms veranderd in amfiboliet. Bij het bereiken van de amfiboliet-faciës krijgen de gesteenten soms een duidelijke foliatie door de vorming van fyllosilikaten als paragoniet en muscoviet en vormen, onder meer, de zogenoemde "Micascisti eclogitici".

Tijdsverloop van metamorfose en gebergtevorming

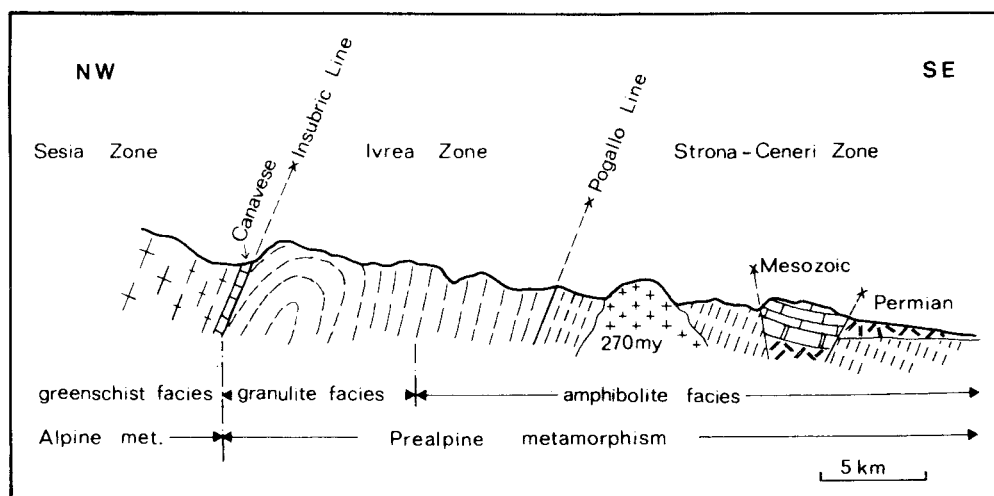
De eerste fase van hogedruk-metamorfose is waarschijnlijk opgetreden over een aaneengesloten gebied dat zich in ieder geval uitstrekte van de Liguriden tot in de Hohe Tauern van Oostenrijk. De latere fasen van metamorfose hebben deze continuïteit verbroken doordat de resultaten van de eerste fase gedeeltelijk werden uitgewist. Absolute ouderdomsbepalingen hebben uitgewezen dat de eerste fase tussen de 60 tot 100 miljoen jaar geleden heeft plaatsgevonden en dus van Vroegtertiaire tijd of zelfs van Laatcretaceïsche tijd kan zijn. De vorming van de eclogieten zoals deze voorkomen in de westelijke Alpen vereist een temperatuur die tussen de 200 en 400° Celcius ligt, met daarbij echter een druk die tenminste 8000 atmosfeer bedraagt, overeenkomend met het gewicht van een gesteentekolom van rond 23 km dikte! Het is echter zeer onwaarschijnlijk dat de dikte van de gesteenteserie boven de glaukofaan-isograad in de West-Alpen ooit zo groot is geweest. De druk moet dus voor een belangrijk deel zijn geleverd door tektonische spanning, veroorzaakt door de naar elkaar toe gaande bewegingen van het Europese en het Afrikaanse continent.

Afb. 5. Profiel door de Zuidelijke Alpen ten W van het Lago Maggiore. De gesteenten op de profiellijn ten ZO van de Insubrische Lijn behoren tot de basis van de Zuid-Alpen: de Ivrea-zone. Zijn bestaan uit onderkorst/bovenmantelmateriaal, dat mogelijk door opschuiving naar boven kwam. De metamorfose zou Caledonisch van ouderdom zijn; de gesteenten hebben de hoge temperatuur en druk van de granulietfaciës bereikt. Aan de NW-zijde van de I.L. hebben de gesteenten de veel minder hoge temperatuur en druk behorend bij de groenschistfaciës ondergaan. De granietintrusie (270 ma) is de Bavenograniet. Naar A. Boriani en A. Zingg.

Voor de ouderdom van de tweede fase zijn waarden gevonden rond de 38 tot 35 miljoen jaar: begin Oligoceen. De omstandigheden tijdens de amfibolietfase in het Simplon-gebied konden worden bereikt onder een gewicht van een bovenliggende gesteentekolom met een dikte tussen de 10 en 25 km! Dit dikke pakket gesteenten ontstond door de opeenstapeling van de Penninische dekbladen tijdens de periode die de hoofdfase van de Alpiene gebergtevorming wordt genoemd. De intrusie van het Bergeller massief heeft plaats gevonden in een stadium dat de Lepontische metamorfose afliep; ouderdomsbepalingen aan de Bergeller gesteenten gaven 28 miljoen jaar, met 25 miljoen jaar voor de Novate-graniet, die als het jongste gesteente van de Bergell wordt beschouwd. De derde metamorfe fase is gedateerd aan de grens van Oligoceen en Mioceen; de preciese relatie met de vorming van het Alpengebergte (bewegingen in het Helvetische domein?) is nog allerminst duidelijk.

Plaattektoniek en de relatie met metamorfe fasen

De moderne theorie van de plaattektoniek, waarmee de grote structuren van de aarde worden verklaard, geeft interessante aanwijzingen voor mogelijke relatie tussen gebergtevorming en fasen van metamorfose. Deze uitspraak dient nog voorzichtig te worden gesteld. Ten aanzien van de toepassing op de Alpen bestaan nog vele punten van onzekerheid zodat nog veel onderzoek verricht moet worden. Het optreden van verschillen in zowel de temperatuur- als de drukgradiënt in de aardkorst kan goed worden verklaard door de processen die zich afspelen in de subductiezones. In de subductiezones, zoals die op het ogenblik voorkomen langs de randen van de Pacificische Oceaan, duikt de lithosfeer van de aarde weg onder het continent. De wegduikende plaat wordt dan langzamerhand in de hete mantelgesteenten opgenomen door opsmelting. Het bovenste gedeelte van de oceanische plaat bestaat uit bazaltische lava die bedekt is door een relatief dunne laag van sedimenten: zowel de in de diepzee gevormde radiolarieten en kleien als de zandige turbidietafzettingen die dichter langs de randen van de continenten worden gevormd. Dit bovendeel wordt als het ware afgeschoren en stapelt zich, verschud en verplooid, op langs de rand van het continent. Deze laatstgenoemde verschubde en verplooid serie wordt wel beschouwd als zijnde een gebergte in aanleg.



De wegzakkende oceanische plaat is veel kouder dan het omringende mantelgesteente. De gesteenten worden, wegens de slechte warmtegeleiding, slechts langzaam opgewarmd en zo bevindt zich hier een grote hoeveelheid koude gesteenten op een zeer grote diepte, hetgeen aanleiding geeft tot een sterke verlaging van de geothermische gradiënt. Daarnaast zal de druk, vooral in het gebied rond de ombuiging van de oceanische plaat, zeer hoog zijn en in de afgeschoven gesteenteserie zal een hogedruk - lage-temperatuur-metamorfose, zoals die van de glaukofaanschist-faciës, kunnen optreden. De omlaagzinkende plaat zal in de diepere gedeelten langzamerhand worden opgesmolten, welk proces begint op rond 125 tot 150 km diepte. De benodigde warmte is waarschijnlijk voor een gedeelte afkomstig van wrijvingswarmte door de beweging van de oceanische plaat.

Het magma dat ontstaat aan de bovenzijde van de wegzinkende plaat dringt omhoog in de aardkorst en doet het vulkanisme van de zogenoemde eilandenbogen ontstaan. Tegenwoordig vinden we voorbeelden in Japan, de Kurilen en Indonesië. Het transport van het magma zorgt voor een grote warmtetoevoer en geeft aanleiding tot een hoge geothermische gradiënt. Deze hoge gradiënt zou zich dan kunnen weerspiegelen in het type van metamorfose dat is opgetreden in de Lepontische Alpen (zie afb. 2).

Metamorfe formaties aan het aardoppervlak

Metamorfe gesteenten, die nu aan de oppervlakte zijn ontsloten geven aan, dat zij ten tijde van de metamorfe processen bedekt lagen onder kilometers dikke pakken gesteenten, die naderhand door vertering en erosie zijn weggevoerd. Uit de berekeningen van de snelheid van de denudatie, die sinds het Midden-Tertiair gemiddeld tussen de 1/2 en 1 mm per jaar heeft bedragen, kan worden opgemaakt dat er reeds grote dikten aan gesteenteseries zijn verdwenen sinds het Alpengebied werd gevormd. Ook kan een ruw idee worden verkregen over de dikte van de bedekking en over de mogelijke omstandigheden tijdens de metamorfe fasen.

Het bovengenoemde bedrag van het 10 tot 25 km dikke gesteentepakket, dat verdwenen zou zijn van de interne Alpen, is dus met de huidige snelheid van denudatie wel haalbaar. Een bijkomend punt is, dat er langs de Insubrische Lijn belangrijke verticale bewegingen hebben plaatsgevonden, waarbij het noordelijk gedeelte (de interne Penniden) waarschijnlijk ongeveer 15 km is opgeheven ten opzichte van de Zuidelijke Alpen. Afb. 5.

Daarnaast kan worden opgemerkt dat de snelheid van opheffing van het Alpengebied in recente tijd een toename te zien geeft; het sterke reliëf wijst hierop. Metingen van de laatste decennia geven een gemiddelde opheffing van rond 1 mm per jaar, een opheffing die dus zo snel gaat dat de denudatie het niet heeft kunnen bijhouden, waardoor de algemene hoogte van het landoppervlak toeneemt.

Enige literatuur

- C. Biermann: Bouw en ontwikkeling van de Zwitserse Alpen; *Gea*, vol. 17 (1984) nr. 1;
G.A. Chinner: in *Petrology for Students* (door S.R. Nockolds, B.W.O'B. Knox en G.A. Chinner): *Metamorphic rocks*; Cambridge Univ. Press, Cambridge, 1978;
R. Mason: *Petrology of the Metamorphic Rocks. Textbook of Petrology*, Vol. 3; Allen & Unwin, London, 1978;
A. Miyashiro: *Metamorphism and Metamorphic Belts*; Allen & Unwin, London, 1979;
Schweizerische Mineralogische und Petrographische Mitteilungen, Band 54, 1974;
R. Trümpy (ed.): *Geology of Switzerland*; Wepf & Co., Basel, 1980;
W.C.P. de Vries: *Metamorfose*; *Gea*, vol. 17 (1984) nr. 2;
idem: *Metamorfe gesteenten en hun relaties in het veld*; *Gea*, vol. 17 (1984) nr. 4;
H.G.F. Winkler: *Petrogenesis of Metamorphic Rocks*; Springer, New York, 1979.

In de artikelen "Metamorfose" en "Metamorfe gesteenten en hun relaties in het veld" in *Gea* 1984 nr. 2 en 4 werden de basisbegrippen betreffende het onderwerp metamorfose behandeld. Voor een verklaring van de "moeilijke woorden" in dit artikel "Metamorfose der Alpen" verwijzen we dan ook naar de genoemde eerdere afleveringen van de schrijver.

De secundaire koper- en loodmineralen van Cap Garonne (Var, Z-Frankrijk)

door drs. W.R. van den Berg

In mineralogisch opzicht genieten de mijnen van Cap Garonne sinds lange tijd een zekere bekendheid in Europa. Deze bekendheid is vooral te danken aan het voorkomen van het mineraal cyanotrichiet en de adamiënvariëteit kobalt-adamien. De recente opkomst van de micromount-mineralogie in Frankrijk heeft de studie van de mineralen in Cap Garonne dermate geïntensiveerd, dat in de laatste jaren een groot aantal voor deze vindplaats nieuwe mineralen gevonden is. Dit was voor ons de aanzet tot twee vakanties met bestemming La Garonne om ons verder te kunnen verdiepen in de mineralogie van deze rijke en tevens mooie vindplaats.

U bereikt Cap Garonne door vanuit Toulon de route nationale N559 naar Hyères te nemen. Na ongeveer 10 km komt u in het dorpje Le Pradet, waar u rechts afslaat naar

La Garonne. Dit is een eenvoudige badplaats aan de baai van Toulon; de veel bekender en mondainer badplaatsen Hyères en Le Lavandou liggen in de omgeving. De rest van de route is af te lezen van afb. 1. Bij de mijn zijn vóór de oude bedrijfsgebouwen twee ruime parkeerplaatsen aangelegd met het oog op de vele wandelaars en trimmers in de heuvels waarop de mijnen liggen.

Het was C.J. Guillemin, die in 1951 promoveerde op een proefschrift, gewijd aan de mineralogie en metallogeneze van de lood-koperafzettingen van Cap Garonne. Van deze studie heb ik dankbaar gebruik gemaakt bij het samenstellen van dit artikel.