

Inhoud:

Metamorfose in de Ardennen	81	Het bewaren van mineraalkorrels en andere objecten uit zandmonsters	98
Schokeffecten in mineralen ontsluit	87	De registratie van micromounts	100
Zinkmineralen	91	De puntjes op de i	101
Bevat dit mineraal zink? Chemische sneltest	93	Zelfbouw-spoelinstallatie	102
Stenen verrassingen in East Anglia (GB)	94	Boekbesprekingen	103
Het huis van de Aarde staat in Den Oever	96	Zand: mineraalscheidingen met een magneetscheider	106
Een compact opbergsysteem voor fossielen	97	Magneetscheiding met een "supermagneet"	108
		Het Ei van Columbus	to. 108

Metamorfose in de Ardennen

door Timo G. Nijland

Inleiding

Metamorfose, de aanpassing van gesteenten aan veranderende externe omstandigheden in de aardkorst en aardmantel, wijzigt het aanzicht van gesteente aanzienlijk, en kan soms in eerste instantie verhullen of het oorspronkelijk om afzettings- of stollingsgesteenten gaat. Ook dicht bij Nederland komen gesteenten voor die illustreren hoe metamorfose in haar werk gaat, en wel in de Belgisch-Franse Ardennen. Hieronder volgt, na een beknopte uitleg van dit voor de vorming van de aardkorst zeer belangrijke proces, allereerst een beschrijving van die metamorfose in de Ardennen, en daarna een klein, elf stops omvattend, overzicht van mogelijke excursiepunten, waar de lezer zelf één en ander in oenschouw kan nemen.

Metamorfose, een korte introductie

Metamorfose (omzetting) is het proces waarbij afzettings- en stollingsgesteenten, en vanzelfsprekend ook gesteenten die reeds eerder gemetamorfiseerd zijn geworden, een verandering ondergaan in hun mineralogische samenstelling en textuur, omdat zij zich aanpassen aan veranderingen in externe fysische eigenschappen (met name druk en temperatuur) en chemische variabelen. Deze aanpassing mag, maar hoeft niet, gepaard te gaan met veranderingen in structuur (door deformatie) en chemische samenstelling.

Metamorfose kan gerelateerd zijn aan:

- grootschalige plaattektonische processen zoals korstverdikking (gebergtevorming) en korstverdunding (extensie), in welk geval we spreken van regionale dynamische metamorfose; de gesteenten zijn dan veelal gericht,
- het geleidelijk begraven van sedimenten in een afzettingsbekken; dit is **regionale begravingsmetamorfose**,
- de intrusie van magmatische gesteenten, de z.g. **contactmetamorfose**,
- de circulatie van hete vloeistoffen: **hydrothermale metamorfose**, b.v. bij mid-oceanische ruggen,

- het inslaan van meteorieten, de z.g. **impact- of schokmetamorfose**.

Processen als verwerking en diagenese worden in het algemeen niet tot de metamorfose gerekend.

In het veld is metamorfose vaak te herkennen aan het voorkomen van mineralen (of associaties daarvan) die slechts binnen een beperkt druk- en temperatuurbereik gevormd kunnen zijn en, in het geval van regionale dynamische metamorfose, aan hun gerichtheid. De nieuwgevormde mineralen zijn de z.g. **metamorf indexmineralen**. Aan de hand hiervan definieert men **isograden**, d.w.z. de lijn die de punten op de topografische kaart verbindt waar een bepaald metamorf indexmineraal voor het eerst optreedt, en **metamorf facies**, d.w.z. druk/temperatuur-bereiken waarin een bepaalde, algemeen voorkomende associatie(s) van mineralen stabiel is, d.w.z. niet zal overgaan in een andere associatie. De individuele metamorf facies worden zodanig gedefinieerd dat zij van toepassing zijn voor gesteenten van uiteenlopende chemische samenstelling.

In essentie zijn er drie metamorf faciesreeksen:

- 1) die met een lage druk/temperatuur-verhouding, d.w.z. de temperatuur is relatief hoog, en de druk relatief laag; deze reeks komt dus hoofdzakelijk voor bij contactmetamorfose,
- 2) die waarbij de druk/temperatuur-verhouding relatief hoog is, en
- 3) die waarbij de druk/temperatuur-verhouding laag tot middelmatig is. Deze laatste reeks bestaat uit (met oplopende temperatuur): zeolietfacies → prehniet-pumpellyietfacies → groenschistfacies → amfibolietfacies → granulietfacies. De groenschistfacies komt overeen met het bereik van ruwweg 300 tot 450/500°C en 1 tot 8 kilobar, de druk die heerst in de aardkorst op een diepte van ongeveer 4 tot 28 km. In vagere termen spreekt men bij het oplopen danwel afnemen van temperatuur en druk van hoger gradig danwel lager gradig. Merk op dat dit relatieve begrippen zijn. Voor een uitgebreide, recente discussie van metamorf facies leze men Miyashiro (1994) [1].

Metamorfose dicht bij huis: de Ardennen

Reeds sedert anderhalve eeuw is bekend dat ook in de directe omgeving van Nederland kennis gemaakt kan worden met het

Tabel I. Chemische formules van de in de tekst genoemde mineralen

Albiet	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Amfibool	$(\text{Na}, \text{K})_{0-1}(\text{Ca}, \text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}, \text{Li})_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Mn}, \text{Ti})_5(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH}, \text{F})_2$
Andalusiet	Al_2SiO_5
Anorthiet	$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
Apatiet	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F}, \text{Cl}, \text{OH})$
Ardenniet	$(\text{Mn}^{2+}, \text{Mg})_2(\text{Mn}^{2+}, \text{Ca})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Mg}, \text{Mn}^{3+}, \text{Cu}^{2+})_6[(\text{Si}, \text{P}, \text{V}^{5+}, \text{As}^{5+})_4(\text{O}, \text{OH})_4]/(\text{SiO}_4)_2/\text{Si}_2\text{O}_{10}/(\text{OH}, \text{O})_6]$
Biotiet	$\text{K}_2(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})_6(\text{Fe}^{3+}, \text{Al}, \text{Ti})_{0-2}[\text{Si}_{6-5}\text{Al}_{2-3}\text{O}_{20}](\text{OH}, \text{F})_4$
Brauniet	$\text{Mn}^{2+}\text{Mn}^{3+}_6\text{SiO}_{12}$
Bytowniet	Plagioklaas met tussen 70 en 90% anorthiet
Carpholiet	$\text{MnAl}_2\text{Si}_2\text{O}_6(\text{OH})_4$
Calciet	CaCO_3
Chloriet	$(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}, \text{Ni}, \text{Zn}, \text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Cr})_{12}(\text{Si}_{8-x}(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Cr})_x\text{O}_{20}(\text{OH})_{16})$ met x meestal tussen 1 en 3
Chloritoïd	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Mn})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})(\text{OH})_4\text{Al}_3\text{O}_2[\text{SiO}_4]_2$
Clinochloor	$\text{Mg}_5\text{Al}(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_8$
Clinozoïsiët	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}.\text{AlOH}[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]$
Davreuxiet	$\text{MnAl}_6\text{Si}_4\text{O}_{17}(\text{OH})_2$
Diopsied	$\text{CaMgSi}_2\text{O}_6$
Dolomiet	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Epidoot	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}(\text{Fe}^{3+}, \text{Al})\text{OH}[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]$
Gahniet	ZnAl_2O_4
Grafiët	C
Granaat	$(\text{Ca}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}, \text{Mg})_3(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Hematiet	Fe_2O_3
Ilmeniet	FeTiO_3
Kaoliniet	$\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{O}_{10}](\text{OH})_8$
Kutnahoriet	$\text{Ca}(\text{Mn}, \text{Mg})(\text{CO}_3)_2$
Kwarts	SiO_2
Labradoriet	Plagioklaas met tussen 50 en 70% anorthiet
Magnetiet	$\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$
Margariet	$\text{Ca}_2\text{Al}_4[\text{Si}_4\text{Al}_4\text{O}_{20}](\text{OH}, \text{F})_4$
Muscoviet	$\text{K}_2\text{Al}_4[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20}](\text{OH}, \text{F})_4$
Oligoklaas	Plagioklaas met tussen 10 en 30% anorthiet
Ottrelit	$(\text{Mn}, \text{Fe}^{2+})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})(\text{OH})_4\text{Al}_3\text{O}_2[\text{SiO}_4]_2$
Paragoniet	$\text{Na}_2\text{Al}_4[\text{Si}_6\text{Al}_2\text{O}_{20}](\text{OH})_4$
Phengiet	$\text{K}_2\text{Al}_3(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+})[\text{Si}_7\text{AlO}_{20}](\text{OH}, \text{F})_4$
Plagioklaas	Mengreeks tussen albiet en anorthiet
Prehniet	$\text{Ca}_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+})[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$
Pyrophylliet	$\text{Al}_4[\text{Si}_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4$
Rhodochrosiet	MnCO_3
Rutiel	TiO_2
Spessartien	$\text{Mn}_3\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{12}$
Stauroliet	$(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Zn})_2(\text{Al}, \text{Fe}^{3+}, \text{Ti})_9\text{O}_6[(\text{Si}, \text{Al})\text{O}_4]_4(\text{O}, \text{OH})_2$
Sudoiet	$\text{Mg}_5\text{Al}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_8$
Titaniet	$\text{CaTi}[\text{SiO}_4](\text{O}, \text{OH}, \text{F})$
Toermalijn	$(\text{Na}, \text{Ca})(\text{Mg}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mn}, \text{Li}, \text{Al})_3(\text{Al}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_6[\text{Si}_6\text{O}_{18}] - (\text{BO}_3)_3(\text{O}, \text{OH})_3(\text{OH}, \text{F})$
Viridien	$(\text{Mn}^{3+}, \text{Al})\text{AlSiO}_5$
Zirkoon	ZrSiO_4
Zoïsiët	$\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}.\text{AlOH}[\text{Si}_2\text{O}_7][\text{SiO}_4]$

verschijnsel metamorfose, en wel in de Belgisch-Franse Ardennen. De Paleozoïsche sedimenten waaruit de Ardennen opgebouwd zijn, zijn geplooid, eerst in oost-west richting gedurende de Caledonische periode van gebergtevorming, en vervolgens in noordoost-zuidwest richting tijdens de Varistische (Hercynische) orogenese. Dit resulteerde in de vorming van een tweetal grote structuren, z.g. **anticlinoria**. Dit zijn combinaties van plooiën in het gesteente, waarbij het raakvlak over de kruinen van de afzonderlijke plooiën het geheel als het ware als een langgerekt dak omhult. De beide anticlinoria die in de Ardennen gevormd zijn heten respectievelijk het Ardennens en Givonne anticlinorium. In de kern hiervan bevinden zich een viertal massieven met gesteenten van Stavelot, Serpont, Rocroi en Givonne. Afb. 1.

In beide anticlinoria bevinden zich in totaal drie zones met groenschistfaciës metamorfe gesteenten:

1) de zuidzijde van het Massief van Stavelot en de daar aangrenzende jongere gesteenten,

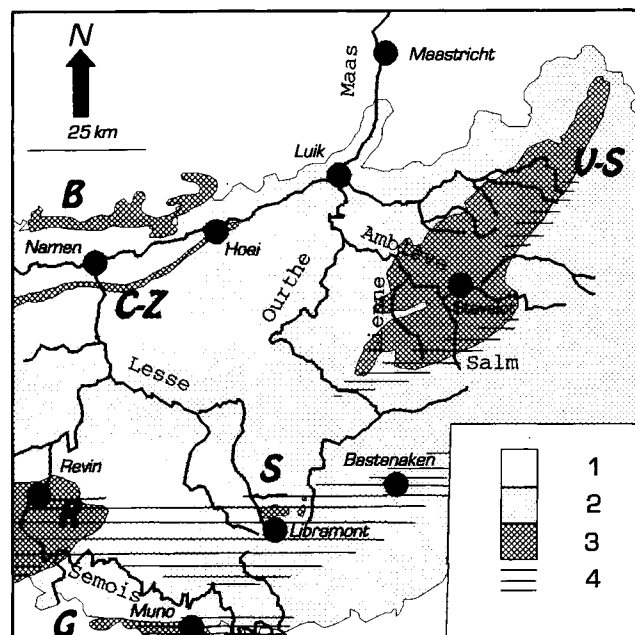
2) een zone die zich uitstrekt van de oostpunt van het Massief van Rocroi, via Libramont, rond het Massief van Serpont tot in de omgeving van Bastenaken, en

3) een zone die de oostpunt van het Massief van Givonne omvat en zich vandaar naar het oosten uitstrekt.

Deze drie zones hebben met elkaar gemeen dat de metamorfose geschied is bij een maximum-temperatuur van circa 360 tot 420°C, en een betrekkelijk lage druk, maximaal circa 3 kilobar. Voorts worden alle drie zones gekenmerkt door het optreden van ondermeer **chloritoïd** en **andalusiet**.

Daarnaast is de metamorfose die de groenschistfaciës-mineraal-assemblages deed ontstaan, en die macroscopisch in het veld zichtbaar is, waarschijnlijk van dezelfde Varistische ouderdom. De ouderdom van de metamorfose is het best bepaald in het Massief van Stavelot, waar zowel radiometrische ouderdomsbepalingen (circa 310 miljoen jaar), als het feit dat de metamorfe mineralen ook voorkomen in de matrix van Varistische conglomeraten, op een Varistische ouderdom duiden. Relaties tussen de groei van de metamorfe mineralen en de schistositeit (= splijtbaarheid) rechtvaardigen in het Massief van Rocroi dezelfde conclusie. Voor de volledigheid dient vermeld te worden dat een oudere, laaggradiger, laat-Caledonische metamorfose (ongeveer 418 miljoen jaar) is aangetoond ten noorden van het Massief van Stavelot.

Niettegenstaande deze overeenkomsten zijn er verschillen, die met name de metamorfose rond de Massieven van Stavelot en Serpont opmerkelijk maken, ook in vergelijking met metamorfe gesteenten in andere gebieden. De verschillende zones zullen daarom hieronder apart meer in detail beschreven worden. Voor de chemische formules van de mineralen die in het volgende deel genoemd zullen worden raadplege men tabel I.



Afb. 1. Caledonische massieven in de Belgisch-Franse Ardennen. Legenda: 1 Post-Carbonische gesteenten, 2 - Carboon en Devoon, 3 - Caledonische massieven, 4 - metamorfe gedeelten. Afkortingen voor de Caledonische massieven: V-S - Venn-Stavelot Massief, S - Massief van Serpont, R - Massief van Rocroi, G - Massief van Givonne, B - Massief van Brabant, C-S - Condroz-zadel.

Het Massief van Stavelot

In het Massief van Stavelot valt de metamorfose het best waar te nemen in fyllieten *) en z.g. *coticules* **). De optredende mineraalassenblages worden hier, behalve door de temperatuur en druk waaronder de metamorfose plaatsvond, in belangrijke mate bepaald door de aanwezigheid van het element mangaan (Mn) in de gesteenten. Doordat de gesteenten sterk geoxideerd zijn en het merendeel van het aanwezige ijzer (Fe) in driewaardige staat (Fe^{3+} , net als in gewoon roest) in plaats van tweewaardige (Fe^{2+}) staat aanwezig is, kan dit door de verschillende metamorfe mineralen moeilijk of niet opgenomen worden. De oxidatie was echter niet dusdanig dat ook mangaan in driewaardige staat gebracht is. Hierdoor is mangaan in vele gevallen in plaats van ijzer in de mineralen ingebouwd, en treffen we vele, relatief ongebruikelijke, mangaananalogen aan van de ijzerrijke mineralen die we normaal bij dergelijke graad van metamorfose aan zouden treffen (en die bijvoorbeeld wel gevonden worden in de andere massieven). Zo vinden we **ottreliet** naast **chloritoïd**, en, zij het slechts op één locatie, **viridien** in plaats van **andalusiet**.

De (gedeeltelijke) vervanging van ijzer door mangaan is belangrijk, omdat de mangaananalogen van mineralen bij een lagere temperatuur gevormd kunnen worden dan het geval geweest zou zijn indien zij, zoals (meer) gebruikelijk, in hoofdzaak ijzer bevatten.

In de mangaanrijke sedimenten, het z.g. Salm (= Tremadoc, Onder-Ordovicium), treft men in het noorden van het massief de uniforme assemblage kwarts - chloriet - muscoviet aan (stop 1). Meer naar het zuiden, heeft **blastese**, d.w.z. nieuwvorming van metamorfe mineralen vanuit een eigen kristallisatiekern, plaatsgevonden van chloritoïd (stop 3), andalusiet of viridien (stop 4). Deze blasten worden behalve door muscoviet, paragoniet, kwarts en chloriet begeleid door fijnkorrelige hematiet, rutiel en spessartien. De blasten zijn deels gevormd ten koste van kaolinit. Echter, er worden tevens tot 1 mm grote blasten van kaolinit gevonden, met in de kern gedeeltelijk opgegeten andalusiet. De vervanging van kaolinit door chloritoïd en/of andalusiet is een verandering die geschiedt onder invloed van oplopende temperatuur. De verandering vindt plaats door middel van een chemische reactie, in de vorm van:

kaolinit + Mn-Ti-hematiet $\rightarrow$ Mn-chloritoïd + rutiel + kwarts + water

Mogelijk doet in een aantal gevallen chloriet mee aan de reactie, waarbij dit mineraal eerst geconsumeerd wordt, en vervolgens, met een andere samenstelling, ook als product optreedt. Vaak aan elkaar grenzend komen fyllieten voor met de assemblage muscoviet - paragoniet - chloriet - chloritoïd - spessartien - kwarts - hematiet - rutiel, en vrijwel dezelfde assemblage, maar dan met andalusiet in plaats van chloritoïd. De verklaring waarom andalusiet danwel chloritoïd in de assemblage optreedt is gelegen in de oxidatiegraad van het gesteente waarin het mineraal voorkomt. Het percentage driewaardig ijzer is beduidend lager in de gesteenten waarin chloritoïd deel uitmaakt van de assemblage, dan in die gesteenten waarin andalusiet optreedt. Dit impliceert dat wanneer de aanwezige hoeveelheid zuurstof opgevoerd zou worden, chloritoïd vervangen zou kunnen worden door andalusiet. Gelet op het feit dat er gesteenten zijn waar beide mineralen naast elkaar optreden, is dit ook inderdaad gebeurd, en wel via de reactie:

Mn-chloritoïd + rutiel + kwarts + zuurstof $\rightarrow$ andalusiet + Mn-Ti-hematiet + water

De belangrijke rol van niet-vaste componenten, met name water en zuurstof, blijkt uit het feit dat rond kwartsgangen, waarvan de

vorming tevens de introductie van vloeistoffen in het gesteente inhield, het gesteente gereduceerd wordt, en als resultaat daarvan van chloritoïd wordt gevormd. De 'grote' blasten van kaolinit met andalusiet in de kern zijn evident gevormd door het (gedeeltelijk) in omgekeerde richting verlopen van de reacties waardoor de andalusiet oorspronkelijk gevormd werd.

Een speciaal geval is de vorming van de mangaananaloog van andalusiet, viridien. Dit vergt dat behalve kaolinit ook een mangaanrijk mineraal reageert. Aangezien in viridien inclusions van brauniet optreden, is de volgende reactie waarschijnlijk:

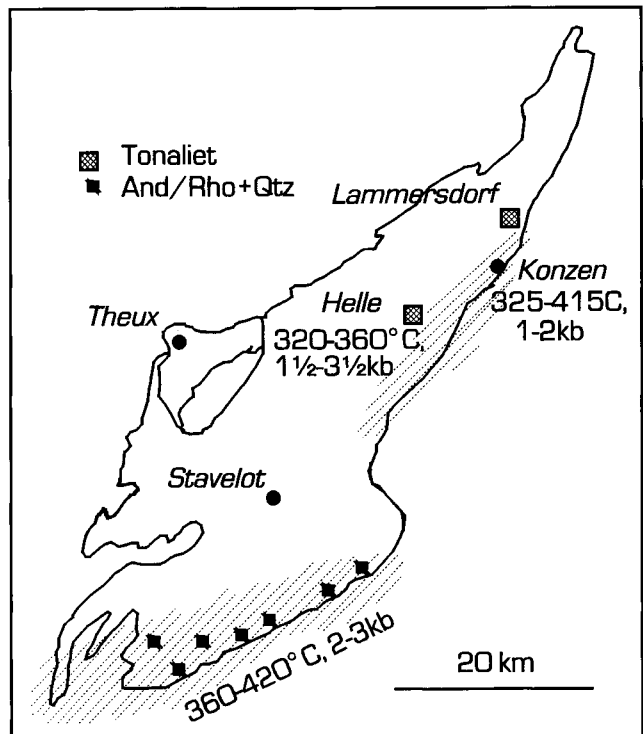
kaolinit + brauniet $\rightarrow$ viridien + kwarts + water

Een andere mogelijkheid is dat hematiet, waarin mangaan in driewaardige staat aanwezig kan zijn, een rol speelde:

kaolinit + Mn-component van hematiet $\rightarrow$ viridien + brauniet + water + zuurstof

Andere mangaanrijke mineralen die voorkomen in het metamorfe deel van het Massief van Stavelot zijn **carpholiet** en, veel minder veelvuldig, **ardenniet**. Beide komen voor in kwartsaders in de mangaanrijke fyllieten. Het voorkomen van carpholiet is beperkt tot het laaggradigste deel van het metamorfe gebied in het Massief van Stavelot. Ardenniet komt zowel voor in assemblages met kwarts, carpholiet, sudoiet, muscoviet en hematiet, die gevormd zijn bij 300 tot 350°C, als in assemblages die bij een enigszins hogere temperatuur, 360 tot 420°C, gevormd zijn, namelijk met kwarts, spessartien, clinochloor, sudoiet, muscoviet, hematiet, gahniet en rutiel, of met kwarts, albit en apatiet. Kleurenfoto E.

Een ander speciaal geval zijn de z.g. *coticules*, fijnkorrelige spessartienhoudende kwartsieten, die ingeschakeld zijn in de sterk geoxideerde paarse fyllieten (stop 2), zie kleurenfoto's C en D. Chemisch onderscheiden ze zich van de fyllieten door een veel



Afb. 2. Het Massief van Stavelot, met daarop aangegeven de metamorfe gedeelten, en bijbehorende schattingen van temperatuur en druk die op het hoogtepunt van de metamorfose geheerst hebben, het voorkomen van andalusiet en/of de associatie rhodocriet + kwarts, en de tonalietintrusies van Helle en Lammersdorf.

*) **Fylliet**: metamorf, van oorsprong kleilig gesteente, iets grofkorreliger dan lei, met minder duidelijke schistositeit dan deze.
) **Coticule: fijnkorrelige, spessartiengranaat-houdende kwartsiet.

hoger mangaangehalte en een zeer gering gehalte aan ijzer. Vermoedelijk gaat het hier om al voor de metamorfose omgezette vulkanische tuffen. In het kader van dit artikel is echter belangrijk dat de *coticules* door hun afwijkende samenstelling een andere metamorfe mineraalassenblage bevatten: muscoviet - paragoniet - chloriet - spessartien - kwarts. Chloritoid en andalusiet zijn afwezig.

Verschillende mineraalassenblages geven een indicatie voor de temperatuur en druk waaronder zij gevormd zijn (afb. 2). Het optreden van pyrophylliet aan de noordostrand van het massief (Konzen boring) duidt op 325 tot 415°C en 1 tot 2 kilobar, terwijl het voorkomen van rhodochrosiet met kwarts naast andalusiet 360 tot 420°C en 2 tot 3 kilobar aangeeft. Het optreden van prehniet - chloriet - epidoot in de tonaliet *** van Helle in het noorden van het massief duidt op een iets lagere temperatuur, 320 tot 360°C bij $2\frac{1}{2} \pm 1$ kilobar.

De Massieven van Rocroi en Serpont, en de omgeving van Libramont en Bastenaken

In de metamorfe zone die de massieven van Rocroi en Serpont en het daar tussenliggende gebied rond Libramont omvat en een uitloper heeft naar Bastenaken treden de groenschistfacië-assenblages op twee plaatsen op: in en rondom het oostelijk deel van het Massief van Rocroi, en in de omgeving van Libramont, inclusief het Massief van Serpont. Net als in het Massief van Stavelot komen ook hier **chloritoid** en **andalusiet** (veelal omgezet naar kaoliniet) voor. Eén vermelding van stauroliet in 1943 is sedertdien nooit bevestigd.

Het voorkomen van chloritoid (b.v. stop 7) en andalusiet is min of meer analoog aan dat in het Massief van Stavelot, zij het nadrukkelijk met dien verstande dat het mangaangehalte van het gesteente hier dusdanig laag is dat het geen aanleiding heeft gegeven tot afwijkende mineraalassenblages. De metamorfose rond Libramont is echter op een andere wijze bijzonder, en wel in die zin dat calciumrijke plagioklaas (**bytowniet**) en **biotiet** gevormd zijn, hoewel dit geleet op de graad van metamorfose niet verwacht wordt.

Bij Libramont wordt, in wat in de literatuur 'amfibolieten' en epidootgesteenten (*roche maclifère* of *roche à ouralite*) genoemd worden, de volgende reeks metamorfe mineralen aangetroffen: chloriet - plagioklaas - biotiet - amfibool - epidoot - diopsied. Behalve biotiet is in deze en in massieve kalkrijke, kleiige gesteenten, lokaal bekend onder de naam *corneite*, calciumrijke plagioklaas gevormd. In de *corneite* is die veelal een labradoriet (anorthietgehalte 50 - 70%), maar het anorthietgehalte kan oplopen tot 80%; in de 'amfibolieten' betreft het meestal überhaupt bytowniet (anorthietgehalte 70 - 90%). De vorming van zowel biotiet als calciumrijke plagioklaas wordt verklaard door het uiteenvallen van calciet en/of dolomiet:

dolomiet + muscoviet → biotiet + chloriet + calciet + koolzuur

calciet + muscoviet + chloriet → biotiet + anorthiet + koolzuur

calciet + andalusiet (of kaoliniet of pyrophylliet) → anorthiet + koolzuur

In de *corneite* komen, naast biotiet en plagioklaas, chloriet, fijnkorrelige witte glimmer (sericiet), calciet en kwarts voor, alsmede, maar minder frequent, granaat, amfibool, en epidoot geassocieerd met magnetiet. Clinozoïsiest is niet aanwezig. In de 'amfibolieten' en epidootgesteenten komen benevens de genoemde mineralen grafiet, kwarts, granaat, clinozoïsiest, zoïsiest, ilmeniet, titaniet en apatiet voor. Zowel rond het Massief van Rocroi als in het Massief van Serpont is niet alleen blastese van silicaten opgetreden, maar zijn ook op verschillende plaatsen blasten van de oxiden ilmeniet en magnetiet gevormd (b.v. stop 8).

***) **Tonaliet**: een dieptegesteente, in hoofdzaak bestaande uit plagioklaas, met meer dan 20 % kwarts en minder dan 10 % kaliveldspaat.

Het Massief van Givonne

Het patroon van de metamorfose in en rond het Massief van Givonne is buitengewoon complex. In tegenstelling tot wat veelal in metamorfe gebieden wordt waargenomen, is er geen sprake van een logisch patroon van indexmineralen dat past bij oplopen- of danwel afnemende druk en / of temperatuur. Wel vallen vier verschillende zones te onderscheiden, waarvan de laatste drie althans gedeeltelijk overlappen (rond het plaatsje Muno): 1) een zone met biotiet en plagioklaas, 2) een zone met chloriet, 3) een zone met muscoviet, en 4) een zone met chloritoid. Deze laatste drie worden tevens doorsneden door een lithologisch niveau van micaschisten. De zone die gekenmerkt wordt door het voorkomen van chloritoid valt uiteen in een kern waarin blasten van andalusiet en ilmeniet voorkomen, met daaromheen een zone met blasten van pyrophylliet en ilmeniet.

In de zone met chloritoid werd dit mineraal vermoedelijk gevormd door vervanging van pyrophylliet, al valt deze reactie niet microscopisch waar te nemen (pyrophylliet is slechts door middel van röntgendiffractie aangetoond). De chloritoid heeft een relatief constant magnesiumgehalte, hetgeen erop kan duiden dat magnesium gebufferd werd door chloriet, dat steeds in de metamorfe assemblage aanwezig is. De meest waarschijnlijke reactie voor de groei van chloritoid is dan ook:

chloriet-1 + pyrophylliet → chloritoid + chloriet-2

Het feit dat pyrophylliet nog wel voorkomt in het buitenste deel van deze zone en niet meer in de kern duidt op toenemende metamorfose en vervanging van pyrophylliet door andalusiet:

pyrophylliet → andalusiet + kwarts + water

Zoals reeds gezegd worden de drie zones met chloriet, muscoviet en chloritoid doorsneden door een lithologisch niveau van micaschisten. Dit niveau is zowel in metamorfe als mineralogische zin opmerkelijk, omdat in de calciumrijke, kaliumarme, van oorsprong waarschijnlijk kleiige gesteenten een mineraal optreedt dat in de andere metamorfe zones in de Ardennen afwezig is, te weten de

Bijschriften bij de kleurenfoto's

A. Laagmetamorfe Salm-fyllieten in de Lienne-vallei bij km 5,5 aan de N 645: een uitgegraven ertsgang, getuige van de explosie naar mangaanerts. Het gesteente bestaat uit fijnkorrelige, paarse fyllieten; ingeschakelde kwartsitische laagjes zijn mangaan- en ijzerrijk. Stop 1.

B. Een van de reeks coticule-groeven tussen Vielsalm en de Lienne-vallei staat gedeeltelijk onder water. In deze groeven, genaamd Tiers de Regné, zijn de lichte coticule-lagen en paarse fyllieten prachtig ontsloten. Zie voor bijzonderheden Stop 2.

C. Een steile wand in groeve Tiers de Regné geeft een goed overzicht van de lichte granaathoudende kwartsieten, afgewisseld door paars-bruine ottrellet-fyllieten. Ottrellet is de mangaanrijke chloritoid. Stop 2.

D. Oppervlak van een coticule-laag in groeve Tiers de Regné; de grillige donkere vlekken zijn dendritische mangaanoxiden. Deze fijnkorrelige granaathoudende kwartsiet werd tot voor kort op grote schaal geëxploiteerd om er wetstenen van te maken. Deze nijverheid was voor de streek zeer belangrijk; in Salmchâteau is er het Musée du coticule voor ingericht, dat een uitstekend beeld geeft.

E. Ardenniet is een van de bekendste, maar ook zeldzaamste metamorfe mineralen uit de Ardennen. Het afgebeelde exemplaar is uit de Collectie Van Seters (VS 2064) bij de TU Delft en meet 6.5 x 6.5 cm. Het komt uit de buurt van Salmchâteau; dit voorkomen is inmiddels uitgeput.

Kleurenfoto's A en E: T. Nijland; B, C en D: P. Stemvers.



A



B



C

D



E



calciumglimmer **margariet** (o.a. bij Muno; stop 10). Vorming vond mogelijk plaats via de reactie:

pyrophylliet + calciet → margariet + kwarts + water + koolzuur

De nauwe microscopische vergroeiing met chloriet doet echter vermoeden dat zowel margariet als chloriet hier een product van dezelfde metamorfe reactie zijn, mogelijk:

pyrophylliet + dolomiet → margariet + chloriet + kwarts + water + koolzuur

Los van de zones met chloriet, muscoviet en chloritoïd is er, zoals gezegd, een zone met de z.g. *corneite*, zoals die ook in de metamorfe zone rond Libramont wordt aangetroffen. Ook hier worden plagioklaas en biotiet verondersteld gevormd te zijn door decarbonatie (d.w.z. het uiteenvallen van carbonaten), doch de plagioklaas is hier minder calciumrijk (oligoklaas):

chloriet + muscoviet + calciet + albiet → biotiet + oligoklaas + water + koolzuur

In een deel van de *corneite* is geen primaire albiet aanwezig, als gevolg waarvan geen relatief calciumrijke plagioklaas gevormd is. Wel is clinozoïsie ontstaan (stop 11):

chloriet + muscoviet + calciet + kwarts → biotiet + clinozoïsie + water + koolzuur

De temperatuur en druk waaronder de metamorfose plaatsvond in de zone met chloritoïd worden geschat op 415 tot 450°C en minder dan 2½ kilobar. Dit komt goed overeen met schattingen op grond van de samenstelling van chloriet in de assemblage met margariet, die duiden op een temperatuur van ongeveer 400°C.

Excursiemogelijkheden

Ter kennismaking met het verschijnsel metamorfose in de Belgisch-Franse Ardennen volgt hieronder een beknopte excursiegids, met stops in het Massief van Stavelot (stop 1 t/m 5), de metamorfe zone van Libramont-Bastogne (inclusief het Serpont Massief; stop 6 t/m 8), en het Massief van Givonne (stop 9 t/m 11). Aanvullende stops kunnen, voor wat betreft het Massief van Stavelot, gevonden worden in [2] en [3], en voor wat betreft de Libramont-Bastogne-zone en het Massief van Givonne in [4] en [5].

Stop 1: Laaggradig metamorfe Salm-fyllieten in de Lienne Vallei

De ontsluiting is een kleine prospectieput ter hoogte van kilometerpaal 5½ aan de oostzijde van weg N645 door de Lienne Vallei (circa 1 km ten noorden van de afslag naar Rahier). De put is eerder in *Gea* beschreven door Burke [6]. Zie kleurenfoto A. Hier zijn sterk geoxideerde, fijnkorrelige, paarse fyllieten ontsloten, die de assemblage muscoviet - chloriet - kwarts bevatten, en nog geen blasten van chloritoïd of andalusiet. Rhodochrosiet (en in tenminste één geval kutnahoriet) en spessartien treden wel op. In zeer kleine hoeveelheden komen o.a. toermalijn en zirkoon voor. Ingeschakeld tussen de fyllieten treden kwartsitische laagjes op die extra rijk zijn aan mangaan en ijzer, hetgeen zich aan het verweringsoppervlak uit door onder andere het optreden van mangaanoxiden.

Stop 2: Fyllieten en coticules van Tiers de Regné

Reeks groeven op de heuvelrug tussen Vielsalm en de Lienne Vallei. Neem in Sart, aan de N485, de weg naar het noorden (naar weg N822). Circa halverwege, ongeveer op het hoogste gedeelte van de heuvelrug en voor de bosrand, is een onverharde weg naar het westen. Volg deze langs de bungalows tot bij de groeven. Kleurenfoto B.

De *coticules* zijn op verschillende plaatsen afgebouwd, om te dienen als wetsteen. Kwarts en spessartien vormen het hoofd-

bestanddeel van dit gesteente; in kleine hoeveelheden treden chloriet, muscoviet, toermalijn, rutiel en opake mineralen op. Kleurenfoto D.

Tussen de gele spessartienkwartsieten zijn paarse Salm-fyllieten ingeschakeld: kleurenfoto C. In de paarse fyllieten komen behalve kwarts, chloriet, muscoviet en hematiet kleine sub- tot euhedrische kristallen van granaat voor, en pseudomorfozes van kaoliniet naar andalusiet. Tevens komen onregelmatige kwartsgangen voor, waarin groenige andalusiet, chloriet, hematiet, sudoiet en davreuxiet optreden. De andalusiet is grotendeels omgezet naar pyrophylliet en kaoliniet.

Stop 3: Chloritoïdfyllieten van Vielsalm

Rijd vanaf stop 2 terug naar de verharde weg en vervolg deze naar het noorden. Ga bij de T-splitsing naar het oosten, d.w.z. naar Vielsalm. Neem in Vielsalm de N68 naar het zuiden, richting Salmchâteau. Na het centrum van Vielsalm is een afslag naar Rencheux, i.e. het westen, waarbij men de rivier de Salm en de spoorlijn Luik-Luxemburg oversteekt. Het is het beste om bij de brug de auto te parkeren, aangezien u de weg aan de overzijde van het dal naar het zuiden niet in mag rijden. De eerste ontsluitingen treft u aan wanneer u te voet deze weg volgt naar het zuiden, d.w.z. in de richting van Salmchâteau.

Hier zijn grijs-groene fyllieten ontsloten die zich stratigrafisch bevinden op de grens van het Salm 1 en Salm 2. Millimetergrote blasten van chloritoïd zijn macroscopisch zichtbaar. In vergelijking met chloritoïd van andere voorkomens in het Massief van Stavelot is dit één van de mangaanarmste, $(\text{Fe}^{2+}_{1,45}\text{Mn}^{2+}_{0,36}\text{Mg}_{0,16}\text{Al}_{3,93}\text{Si}_{2,11}\text{O}_{10}(\text{OH})_4$, die in het massief voorkomt. De chloritoïd treedt op tezamen met muscoviet, chloriet, kwarts, hematiet, rutiel en zirkoon.

Stop 4: Viridienfyllieten van La Coreux

Loop vanaf stop 3 door in de richting van Salmchâteau. Neem het eerste bospad de helling op. Dit voert u langs een kleine verlaten groeve in *coticules*. Verderop langs dit pad en elders op de helling, boven het eerste grote huis aan de weg, vlak voor deze onder het spoor doorgaat, bevinden zich donkerpaarse fyllieten. In de fyllieten bevinden zich kleine blasten in een micarrijke matrix. Microscopisch blijkt dat het hier om viridien gaat, met een fel geel naar groen pleochroïsme in slijpplaatjes. De blasten bevatten talrijke insluitels, waaronder brauniet en hematiet. Viridien treedt op in een paragenese die verder muscoviet, paragoniet, chloriet, granaat, kwarts, en rutiel bevat. De viridien behoort tot de mangaanrijkste andalusieten die bekend zijn:

$(\text{Al}_{6,36}\text{Mn}^{3+}_{1,47}\text{Fe}^{3+}_{0,07}\text{Si}_{4,07}\text{O}_{20})$

Stop 5: Musée du Coticule te Salmchâteau

Wandel terug naar de auto en vervolg de N68 naar het zuiden, naar Salmchâteau. Aan de Rue du Vieux Marché 23 aldaar is het Musée du Coticule gevestigd. Hier wordt de geschiedenis van de *coticule*-mijnbouw geïllustreerd, maar er is ook aandacht voor andere aspecten van de geologie en mineralogie van de Ardennen.

Stop 6: Typelocaliteit van het verschijnsel boudinage te Bastogne

Neem in Bastogne weg N874 naar Clervaux. Direct na de afslag naar het Mémorial du Mardasson ziet u aan de zuidzijde van de weg een grote, in bedrijf zijnde groeve. Aan de noordzijde van de weg bevinden zich twee oude afgewerkte groeven, door een huis gescheiden. Neem de meest oostelijke groeve.

Alhoewel het verschijnsel boudinage al wel eerder beschreven was, werd dit verschijnsel hier voor het eerst benoemd door Lohest in 1909 [7]. De ontsluiting geldt daarom als typelocaliteit van het verschijnsel dat banken van competente gesteenten, dikwijls kwartsieten of zandstenen, uiteengetrokken worden tot een reeks al dan niet van elkaar gescheiden kussens, dikwijls gescheiden door kwartsaders. Voor een recente structureel geologische analyse raadplege men [8]. Een bijkomend, eveneens reeds sedert de vorige eeuw bekend fenomeen, maar dan van mineralogische aard, is het optreden van 'bastoniet', een mineraal dat zowel macroscopisch als microscopisch lijkt op

gewone biotiet, maar in vergelijking daarmee te weinig kalium bevat. Dit gebrek aan kalium wordt gecompenseerd door de aanwezigheid van ammonium (NH_4).

Stop 7: Chloritoidfyllieten van Libramont

Neem in Libramont de N89 naar St. Hubert. Volg deze onder het spoor door, voorbij de afslag Libramont 3, en voorbij de haakse zijweg. Bij kilometerpaal 36,2 is een parkeerplaats. Op de helling hierboven bevinden zich grijze fyllieten. Behalve chloritoid komen chloriet, kwarts en muscoviet voor, alsmede grafiet en opake mineralen.

Stop 8: Magnetietschisten van Serpont

Volg weg N826 vanuit Libramont naar het noordoosten, richting Freux en Moiricy. Neem in Moiricy de weg naar Remagne. Na ruim één kilometer staat een kleine witte kapel, de Chapelle de Notre Dame de Lourette. Neem het paadje naar de kapel, en ga vervolgens naar de hoger gelegen rotspunt schuin naar rechts. Hier zijn gemetamorfoseerde arkoses (= veldspaaathoudende zandstenen) van de Formatie van Oignies ontsloten, die kwarts, albit, phengiet en chloriet bevatten, alsmede kleine hoeveelheden rutiel, zirkoon en een opaak mineraal. Ondanks de metamorfose bewaren zij nog steeds een scheve gelaagdheid. Als inschakelingen komen groene schisten voor met enige millimetergrote, kubusvormige blasten van magnetiet. Behalve de blasten van magnetiet treden kwarts, chloriet en muscoviet op, begeleid door kleine hoeveelheden toermalijn en zirkoon.

Stop 9: Chloritoidfyllieten van het Massief van Givonne

Volg de N89 vanuit Bouillon naar het zuiden, en passeer de Belgisch-Franse grens. Neem vlak na de grens de afslag naar Givonne en vervolgens de D4 naar Villers-Cernay. Volg in Villers-Cernay de D4 naar Francheval en vandaar de D17 naar Pouru-aux-Bois. Neem aldaar de *route forestière* naar het noorden, langs het riviertje. Na ongeveer 1½ km is een oude groeve aan de westzijde van de weg.

Hier worden zwarte, pyriethoudende kwartsieten afgewisseld met micarieke fyllieten, waarin blasten van chloritoid voorkomen.

Stop 10: Margariet-muscovietschisten van Muno

Keer vanaf stop 8 terug naar Pouru-aux-Bois. Volg de D17 naar Escombres en Messincourt. Neem in die plaats de D19 naar Muno in België. Neem in Muno de afslag naar de Roche à l'Appel, en rijd onder het spoor door (dus volg de weg naar de Roche à l'Appel niet). Direct na de spoorlijn is een kruispunt. In de helling

van de weg naar het noorden, parallel aan de spoorlijn, bevinden zich diverse kleine ontsluitingen.

In deze ontsluitingen zijn micaschisten ontsloten, waarin margariet voorkomt, vaak samen met chloriet, die microscopisch vaak vergroeid is met margariet. De matrix bestaat voornamelijk uit kwarts, met kleine hoeveelheden apatiet, hematiet, muscoviet en rutiel.

Stop 11: Fossielenhoudende corneite met biotiet en clinozoïsetblasten van Muno

Neem dezelfde weg terug en volg nu wel de weg naar de Roche à l'Appel. Parkeer de auto op de aangegeven parkeerplaats en volg het aangegeven bospad tot voorbij de Roche à l'Appel, het conglomeraat aan uw rechterhand.

Hier is de massieve z.g. *corneite* ontsloten, waarin zich blasten bevinden van biotiet en clinozoïset, in een matrix die verder chloriet, muscoviet en kwarts bevat. Ondanks de metamorfose zijn verschillende fossielen bewaard gebleven, waaronder de brachiopoda *Proschizophoria torifera* en *Delthyris dumontianus*, met een ouderdom van Onder-Gedinnien (Onder-Devoon).

Literatuur

- [1] Miyashiro, A., 1994. Metamorphic petrology. University College London Press, Londen, 404 pp.
- [2] Fransolet, A.M. en Kramm, U., 1983. Mineralogie und Petrologie Mn-reicher Metapelite des Venn-Stavelot Massivs, Ardennen, und die varistische Metamorphose im nordwestlichen Rheinischen Schild. Fortschritte der Mineralogie, v. 61, Beiheft 2, p. 31-69.
- [3] Fransolet, A.M., Kramm, U. en Schreyer, W., 1977. Metamorphose und Magmatismus im Venn-Stavelot-Massiv, Ardennen. Fortschritte der Mineralogie, v. 55, Beiheft 2, p. 75-103.
- [4] Beugnies, A., 1985. Excursion du 3 mai 1985: Structure et métamorphisme de l'aire anticlinale de l'Ardenne. Annales de la Société géologique du Nord, v. 105, p. 145-151.
- [5] Robaszynski, F. & Dupuis, C., 1983. Guides géologiques régionaux. Belgique. Masson, Paris, 204 pp.
- [6] Burke, E.A.J., 1990. Ertswinning in België: een rijk verleden. Gea, v. 23, p. 35-41.
- [7] Lohest, M., 1909. De l'origine des veines et des géodes des terrains primaires de Belgique. Annales de la Société géologique de Belgique, v. 36, p. B275-282.
- [8] Jongmans, D. en Cosgrove, J.W., 1993. Observations structurales dans la région de Bastogne. Annales de la Société géologique de Belgique, v. 116, p. 129-136.

Schokeffecten in mineralen ontsluiert

door Dr. J. van Diggelen

Het begon in Arizona

In Centraal-Arizona, in het Cayon Diablo gebied in het zuidelijk gedeelte van het Colorado Plateau, ligt een merkwaardige inzinking, die "Meteor Crater" wordt genoemd. De krater is 180 m diep en heeft een diameter van 1200 m. Afb. 1. De krater is wel rond van vorm, maar enigszins in vierkante zin vervormd, evenwijdig aan breukrichtingen in de omgeving. De wal verheft zich 30 tot 60 m boven de vlakte. De buitenhelling is 13° en bestaat uit materiaal dat uit de kuil afkomstig is, variërend van fijn, poedervormig kwarts tot brokstukken zandsteen zo groot

als een woonhuis. In het droge woestijnklimaat van Arizona is de krater voor sterke verwerking bewaard gebleven in de 25 000 jaar dat hij bestaat.

Toen in 1870 de eerste kolonisten zich in de omgeving van deze krater in Arizona vestigden heette het object "Coon Butte". De krater was uitermate moeilijk bereikbaar door het gebrek aan water in deze streek. Het vlakke, woestijnachtige land rondom de krater was bezaaid met onregelmatige en grillig gevormde, roestige stukjes ijzer. Pas in 1891 werd een monster van dit ijzer onderzocht en toen bleek dat het van meteoritische oorsprong was. Een eerste expeditie slaagde er zonder moeite in 137 brokken meteorietijzer te verzamelen met een gewicht variërend van