

pyriethoudende carbonatiet van het *rauhaugiet II*-type [9]. Behalve aan ijzererts zijn sommige carbonatiëten in het Fen-gebied ook rijk aan apatiet. Gedurende de eerste helft van de Tweede Wereldoorlog deed Goldschmidt, tot hij het land kon ontvluchten, onderzoek hieraan, met het oog op eventuele productie van kunstmest [1]. Na 1953 werd carbonatiet door A/S Norsk Bergverk ontgonnen als niobiumerts.

## Slot

Diegenen die een bezoek aan het Fen-gebied overwegen, dienen er rekening mee te houden dat de ontsluitingsgraad in het zacht glooiende landschap slecht is. Een grote groeve, die tenminste een paar jaar geleden nog in bedrijf was, is gelegen aan het Nordsjø meer, direct onder Ulefoss. In het Fen gebied bevinden zich ook de resten van een stenen christelijke kerk met aanpalend hof uit de Viking tijd, die zeker een bezoek waard zijn.

## Literatuur

- [1] Mason, B., 1992, *Geochem. Soc. Spec. Publ.* 4. [2] Goldschmidt, V.M., 1918, *Vidensk. Ak. Forh.*, 20. [3] Brøgger, W.C., 1921, *Kong. Nor. Vidensk. Selsk. Skr. I. Matem.-Naturvidensk. Kl.* 1921-9:1-402. [4] Barth, T.F.W. & Ramberg, I.B., 1966, in: Tuttle, O.F. & Gittins, J., red., *Carbonatites*. Londen, 225-257. [5] Dahlgren, S., 1994, *Lithos* 31:141-154. [6] Sæther, E., 1957, *Kong. Nor. Vidensk. Selsk. Skr.* 1:1-150. [7] Andersen, T., 1984, *Lithos* 17:227-245. [8] Andersen, T., 1986, *Mineral. Mag.* 50:503-509. [9] Andersen, T., 1983, *Nor. Geol. Tidsskr.* 63:73-82. [10] Åmli, R., 1974, *Intern rap.*, Mineral. Geol. Museum, Oslo. [11] Neumann, H., 1985, *Nor. Geol. Unders. Skr.* 68:1-278. [12] Sørum, H., 1955, *Kong. Nor. Vidensk. Selsk. Forh.* B28:112-119. [13] Klockmann, 1978, *Lehrbuch der Mineralogie*. 16<sup>e</sup> druk, Stuttgart. [14] Bjørlykke, H. & Svinndal, S., 1960, in: Holtedahl, O., red., *Geology of Norway*. *Nor. Geol. Unders.* 208:105-110. [15] Åmli, R., 1977, *Econ. Geol.* 72:855-869. [16] Vogt, J.H.L., 1908, *Nor. Geol. Unders.* 46:1-83. [17] Dahlgren, S., 1978, *Nordagutu*, 1713 IV. *Berggrunnegeologisk kart 1:50.000*. Voorlopige uitgave. NGU.

---

# Het gebruik van kunstharsen als bescherming tegen de oxidatie van pyriet

door Pilar Costagliola\*, Curzio Cipriani\* en Carlo Manganelli Del Fà\*\*,  
bewerkt en vertaald door Ernst A.J. Burke  
Faculteit Aardwetenschappen, Vrije Universiteit  
Amsterdam

---

## Samenvatting

Ijzersulfiden zijn niet stabiel onder oxiderende omstandigheden. Handstukken van pyriet worden in musea zwaar beschadigd door de inwerking van zuurstof en luchtvochtigheid. Het gebruik van gefluorideerde, acryl- en siliconenharsen als bescherming van pyriet is onderzocht in een klimaatkamer en in zure oxiderende oplossingen. De veranderingen van pyriet werden gevolgd met colorimetrische parameters en door het meten van de ijzerconcentratie in etsende oplossingen. Acrylharsen beschermen pyriet slecht als er ultraviolette straling aanwezig is en hebben in het algemeen de neiging om geel te worden. In een vochtige omgeving en in volledig natte omstandigheden isoleren siliconenharsen het mineraal onvoldoende, waardoor water zijn oppervlak kan bereiken en oxideren. Gefluorideerde harsen zijn relatief het best geschikt als beschermende laag door hun goede afscherming en omdat zij volledig doorzichtig zijn zodat de optische eigenschappen van het monster niet gewijzigd worden. Maar geen enkele van de geteste harsen zorgt voor volledige isolatie van de handstukken en daardoor blijft uitwisseling van ionen mogelijk.

## Inleiding

Er bestaat wijdverspreide overeenstemming onder museumcuratoren, dat handstukken van sulfiden mettertijd steeds minder

bruikbaar worden voor zowel tentoonstelling als onderzoek omdat zij sterk reageren op de atmosfeer en omdat zij aangetast worden door blootstelling aan licht. De schadelijke bestanddelen in de atmosfeer zijn vooral waterdamp, zuurstof en koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), en in mindere mate ook zwavel- en stikstofoxiden. Zuurstof speelt de belangrijkste rol in de veranderingsprocessen, alhoewel mineralen in sommige gevallen door geoxideerde oppervlaktelagen beschermd worden tegen verdere corrosie. Een van de belangrijkste factoren die de corrosie beïnvloeden is de relatieve vochtigheid (RV) van de lucht: deze kan de aantasting van sulfiden dramatisch doen toenemen. Howie (1992) heeft een overzicht gegeven van een aantal aspecten van de rol van water dat in contact komt met pyriet in collecties van geologische materialen. Scott (1990) heeft beschreven dat er bij een RV van 60 % en bij een temperatuur van 20 °C op metalen oppervlakken 15 laagjes van watermoleculen gevormd worden, en bij 90 % RV zelfs 30. Volgens de huidige opvattingen in de oppervlaktechemie houdt de aanwezigheid van meer dan drie dergelijke laagjes in dat deze laagjes dezelfde chemische eigenschappen hebben als

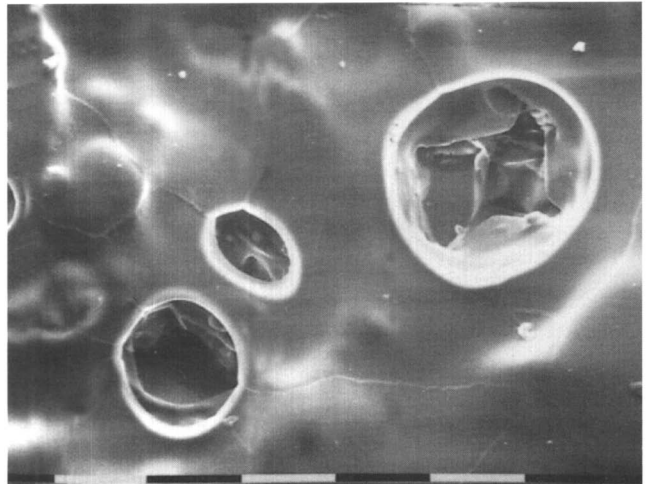
---

\*Museum voor Mineralogie en Lithologie, Universiteit van Firenze  
Via G. La Pira 4, I-50121 Firenze, Italië

\*\*Wetenschappelijk Centrum voor het Onderzoek naar Oorzaken van Verval en Methoden voor Behoud van Kunstwerken,  
Via Alfani 74, I-50121 Firenze, Italië

De oorspronkelijke versie van dit artikel (*Pyrite oxidation: protection using synthetic resins*) is verschenen in *European Journal of Mineralogy*, Vol. 9 (1997), 167-174.

Afb. 1. Klimaatkamertest, cyclus 1. Pyriet behandeld met NH (na 21 dagen bij 40 °C en 75 % RV in de aanwezigheid van UV licht). Gaten en breukjes (lichtgrijze dunne sporen) tasten de hars aan (opname met raster-elektronenmicroscop, de meetlat onderaan is verdeeld in segmenten van 0,1 mm).



van grotere hoeveelheden water. De isothermen voor de absorptie van vochtigheid en zuurstof door in de natuur voorkomende pyriet tonen een belangrijke toename van de absorptie, en dus ook van de oxidatie van pyriet, bij RV-waarden van meer dan 50 % (Howie, 1992). De hoeveelheid vocht die uit de lucht geabsorbeerd wordt is afhankelijk van het aandeel waterdamp in de lucht en van het totale oppervlak waarmee het vocht kan worden opgeslorpt. Zoals veel mineralen kan pyriet van nature in bepaalde mate poreus zijn: dit beïnvloedt zijn aantasting, omdat bij grotere porositeit het oppervlak waarmee vocht aangetrokken wordt groter is. In poreuze materialen kan water immers neerslaan bij belangrijk lagere temperaturen dan het dauwpunt, dus bij een RV van minder dan 100 %, en dit water kan in de poriën ook blijven bestaan bij relatief lage RV.

De eenvoudigste methode om corrosie van pyriet te voorkomen is om de blootstelling aan waterdamp, zuurstof en licht te verminderen. Er zijn (1) dynamische methoden om dit doel te bereiken, bv. computergestuurde luchtbeheersing in een museum, en (2) statische methoden, waaronder behandeling van het oppervlak van mineralen. De laatste zijn waarschijnlijk de goedkoopste, alhoewel zij enige nadelen hebben, waarvan het belangrijkste is dat die behandeling de aanblik van het mineraal kan veranderen.

Het verval van pyriet is waarschijnlijk een van de ernstigste problemen bij het bewaren van specimen in een museum, maar ook in de open lucht, zoals bij afvalhopen van mijnen, waar door dit proces aanzienlijke milieuproblemen heersen. In deze studie zijn een aantal kunstharsen gebruikt om de oxidatie van pyriet te verhinderen. Vier soorten van harsen zijn getest op pyrietmonsters van het eiland Elba uit de verzameling van het Museum voor Mineralogie van de Universiteit van Firenze (Florence). De doeltreffendheid van de harsen wat betreft (1) kleurveranderingen en (2) mate van isolatie van de omgeving is getest in een klimaatkamer en in zure en oxiderende waterige oplossingen.

## Monsters

De gebruikte pyrietmonsters zijn afkomstig van de skarn ijzerertsafzettingen van het eiland Elba. Een overzicht van de metallogenie van het eiland is recentelijk gepubliceerd door Lattanzi en co-auteurs (1994). De bestudeerde pyrietkristallen zijn meestal euhedrisch (pentagondodekaëders). Soms wordt pyriet vergezeld door kleine hoeveelheden hematiet en andere sulfiden. Onder de microscoop is pyriet gewoonlijk homogeen, maar door middel van etsen zijn soms groeizonerings en diffuse porositeit zichtbaar. In deze gevallen zijn chemische analyses uitgevoerd, maar er zijn geen chemische zonering of andere elementen dan ijzer en zwavel aangetroffen. Er zijn geen opvallende porositeitsverschillen van monster tot monster, maar lokaal komen er talrijke insluitels van silicaten (vooral kwarts) voor.

Pyriet is een broos materiaal en tektonische spanningen veroorzaken onveranderlijk breuken en cataclastische texturen, maar in de bestudeerde monsters waren deze texturen niet bijzonder sterk ontwikkeld.

## Vervalproducten in het museum

Omgezette monsters van pyriet zijn eerst met een binoculaire microscoop bekeken. De omzettingsmineralen zijn wit en dendritisch en worden vooral gevormd langs breuken en korrelgrenzen. Met röntgendiffractie zijn deze mineralen geïdentificeerd, het zijn vooral ijzersulfaten. De meest aanwezige fase is szomolnokiet ( $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), vaak de enige omzettingfase in veel monsters. Andere gevormde fasen zijn rozeniet ( $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), en in mindere mate melanterioriet ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) en römëriet [ $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}(\text{SO}_4)_4 \cdot 14\text{H}_2\text{O}$ ]. Het stabiliteitsgebied van deze gehydrateerde ijzersulfaten hangt af van temperatuur en RV. Bij toenemende temperatuur

en afnemende RV zijn in natuurlijke omstandigheden sulfaten met lagere watergehaltes stabiel. Ook de vervanging van ijzer door andere elementen speelt een rol: koperhoudende melanterioriet zet om naar siderotiel ( $\text{FeSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ), maar onder identieke omstandigheden dehydrateert koperrijke melanterioriet naar rozeniet.

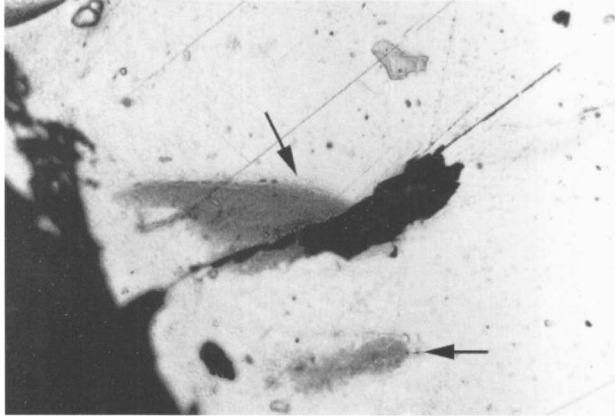
## Harsen

De behandeling van het oppervlak van mineralen moet aan de volgende eisen voldoen:

- 1) minimale wijziging van de optische kenmerken van de mineralen (kleur, glans, etc.);
  - 2) omkeerbaarheid: het gebruikte materiaal moet indien nodig te verwijderen zijn, het moet dus oplosbaar zijn, zelfs na veel jaren;
  - 3) chemische stabiliteit: het materiaal mag niet reageren met het mineraal dat van een beschermend laagje voorzien wordt en evenmin met zuurstof, water en andere bestanddelen van de atmosfeer, en het mag ook niet door licht aangetast worden.
- Om een materiaal te vinden dat aan al deze eigenschappen voldoet zijn de volgende harsen getest: acrylhars (*Paraloid B72*), gefluorideerde harsen (*NH* en *NH+Kynar*) en siliconenhars (*Dri-film*). Het Wetenschappelijk Centrum in Florence voor het Onderzoek naar Oorzaken van Verval en Methoden voor Behoud van Kunstwerken gebruikt deze harsen reeds veelvuldig om het verval te verhinderen van steen in gebouwen en kunstwerken. De acrylhars is een copolymeer van ethylmethacrylaat en methylmethacrylaat; een oplossing van 5 gewichts-% van deze verbinding in een mengsel van gelijke hoeveelheden aceton en methylchloride werd gebruikt om de pyrietmonsters te behandelen. Gefluorideerde elastomeren (*NH* en *NH+Kynar*) zijn mengsels van hexafluorpropaan (HFP) en vinylideenfluoride (VF) copolymeren in verschillende verhoudingen: *NH* is samengesteld uit 33 gewichts-% HFP en 66 gewichts-% VF; *Kynar* bevat 1 gewichts-% HFP en 99 gewichts-% VF; *NH+Kynar* is een mengsel van 95 gewichts-% *NH* en 5 gewichts-% *Kynar*. Gefluorideerde harsen werden in aceton (5 gewichts-%) opgelost voor de monsterbehandeling. Siliconenhars is een polymethylsiloxaan; de monsters werden behandeld met een oplossing van 70 gewichts-% van deze stof in een mengsel van gelijke hoeveelheden petroleumether (*white spirit*) en 1,1,1 trichloorethaan.

## Onderzoekmethoden

**Klimaatkamer.** Een pyrietmonster werd gesplitst in fragmenten met een gewicht tussen 2,2 en 11,7 gram en die elk een kristalvlak hadden van minstens 1 cm<sup>2</sup>. De fragmenten werden gedurende enkele seconden met HCl gewassen om alle oxidatieproducten van het oppervlak te verwijderen, daarna gedroogd met aceton, vervolgens gedurende 24 uur in een droogapparaat geplaatst en tenslotte gewogen. Ieder fragment werd voorzien van een laagje hars (0,003 gram hars per cm<sup>2</sup> oppervlak), en opnieuw in een droogapparaat gezet tot het gewicht stabiel was. Daarna werden de fragmenten in een klimaatkamer (*Mazzali*



Afb. 2. Klimaatkamertest, cyclus 2. Pyriet behandeld met Dri-film (na 31 dagen bij 45 °C en 90 % RV zonder UV licht). De twee grijze gebieden in het centrum (pijl-tjes) geven aan dat de harslaag daar heeft losgelaten van de pyriet eronder (opvallend licht, evenwijdige nicols, 300x).

*Climatest*) geplaatst onder de volgende omstandigheden:

Cyclus 1: 21 dagen bij 40 °C en 75 % RV in aanwezigheid van ultraviolet licht;

Cyclus 2: 31 dagen bij 45 °C en 90 % RV;

Cyclus 3: 10 dagen bij 40 °C en 60 % RV.

De mate van oxidatie/omzetting van de monsters werd bepaald door de kleurveranderingen van het oppervlak van pyriet te meten: een niet-aangetast oppervlak van pyriet heeft in gereflecteerd licht een lichtgele kleur en geoxideerde pyriet heeft een bruine kleur. Iedere kleur kan door middel van een colorimeter in kwantitatieve getallen uitgedrukt worden, en daardoor kunnen de kleurwijzigingen tijdens het verloop van de testen nauwkeurig gevolgd worden.

**Etstesten.** De mate van bescherming door de harsen werd bepaald door de hoeveelheden ijzer te meten die door de van een deklaag voorziene monsters aan een etsende oplossing afgegeven werden. Daarvoor werden pyrietfragmenten gebruikt van ongeveer drie gram die gedurende een paar seconden met HCl gewassen waren, afgespoeld met water en gedroogd met aceton. De monsters (zonder hars) werden geëtsd bij een temperatuur tussen 20 en 25 °C met een oplossing die 10 volume-% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (35 vol.) bevatte en die aangezuurd was met HCl. Na 24 uur werd het ijzergehalte van de oplossing bepaald. Daarna werden dezelfde monsters behandeld met de harsen en werd de etstest herhaald.

## Resultaten en bespreking

Na de testen met klimaatkamer en etsende oplossing werden de harsen van de pyrietfragmenten verwijderd met daarvoor geschikte oplosmiddelen. Observatie met een opvallend-licht microscoop toonde aan dat er geen harsresten meer aanwezig waren: de harsen kunnen dus perfect verwijderd worden, zelfs na beschadiging tijdens de testen.

**Klimaatkamer.** De omstandigheden die voor de testen in de drie cycli gekozen werden zijn beslist niet representatief voor het milieu dat normaal in een museum heerst. Maar zij werden toegepast om het gedrag van pyriet en de harsen te kunnen testen onder extreme condities, om de aantastingsprocessen die plaatsvinden in een museum te versnellen. De toegepaste harsen veranderen (vóór de testen) de originele kleur van de monsters niet: behandelde en niet-behandelde oppervlakken zijn met het blote oog niet van elkaar te onderscheiden.

Door het gebruik van ultraviolet licht in cyclus 1 kon de invloed van straling op de harsen vastgesteld worden. De mate van bescherming daartegen is zeer verschillend voor de diverse harsen, zelfs tussen de twee gefluorideerde harsen. Acrylhars beschermt het monster praktisch helemaal niet. Waarnemingen met optische microscoop en raster-elektronenmicroscoop wijzen uit dat deze hars tijdens de test duidelijk ondoorzichtig werd en dat de aangebrachte laag breken vertoonde. De siliconenhars beschermt relatief goed, maar wordt minder doorzichtig en duidelijk gelier; in sommige gevallen laat de laag helemaal los en wordt de pyriet aangetast. De NH gefluorideerde hars gedraagt zich net als de acrylhars; na 7 dagen was de "beschermende" laag overal

gebroken en flink ondoorzichtig. Aan het eind van cyclus 1 was de laag NH dermate aangetast dat de pyriet aan de atmosfeer was blootgesteld, in sommige gevallen met flinke gaten in de laag (Afb. 1). De NH+Kynar hars biedt de beste bescherming, met verwaarloosbare veranderingen in de oorspronkelijke kleur van de monsters.

De hoge RV tijdens cyclus 2 geeft informatie over de bescherming door de harsen tegen aantasting van het mineraaloppervlak door waterdamp. Kleurwijzigingen zijn het sterkst bij *Dri-film* en *NH*, en het laagst bij *NH+Kynar* en *Paraloid*, die op grond van de gemeten kleurwaarden de monsters vrij goed afschermen. Maar de acrylhars *Paraloid* heeft net als in de vorige cyclus weer verlies aan doorzichtigheid, blijkbaar een intrinsieke eigenschap van deze hars. Het laagje van de siliconenhars liet ook los (Afb. 2), net als in de vorige cyclus, met name rond onregelmatigheden van het mineraaloppervlak.

In cyclus 3 werden aan het eind van de test geen kleurwijzigingen vastgesteld tussen niet-behandelde pyriet en pyriet die met een laagje hars was bedekt. Dit resultaat suggereert dat 60 % RV een drempelwaarde is voor de omzetting van sulfiden. Deze waarde komt evenwel niet overeen met de resultaten van Howie (1992), die een "kritische waarde" van 30 % RV gevonden had via een wiskundige behandeling van experimentele gegevens.

**Etstesten.** Het etsen van pyrietfragmenten toont aan dat stukjes die behandeld zijn met de siliconenhars *Dri-film* bijna evenveel ijzer aan de oplossing afgeven als stukjes pyriet die geen enkele behandeling ondergingen: dit bevestigt de resultaten van de klimaatkamertesten dat siliconenhars nauwelijks enige bescherming biedt. De beste bescherming tegen etsen komt van *Paraloid* en van *NH+Kynar*, die beide de uitwisseling tussen pyriet en de aantastende oplossing sterk verlagen. De zuurtegraad speelt ook nog een rol: oplossingen met een lagere pH (= sterker zuur) halen meer ijzer af van de pyriet dan die met een hogere pH.

## Conclusies

De testen in de klimaatkamer en met etsende oplossingen tonen aan dat siliconenhars en acrylhars geen afdoende bescherming bieden tegen het verval van pyriet. De siliconenhars is absoluut ongeschikt in een atmosfeer met hoge relatieve vochtigheid, terwijl de acrylhars geen enkele bescherming biedt tegen ultraviolette straling. Van de beide gefluorideerde kunstharsen is *NH+Kynar* veruit de beste: in de klimaatkamer isoleert deze hars pyriet effectief van de omringende atmosfeer, en ook in de etsende oplossing wordt pyriet goed afgeschermd, zij het niet volledig. Maar van de onderzochte harsen is *NH+Kynar* ongetwijfeld het meest geschikt om in musea pyriet te beschermen tegen oxidatie/omzetting.

Geen enkele geteste hars isoleert evenwel pyriet volledig: er is altijd enige uitwisseling mogelijk tussen het oppervlak van de pyriet en zijn omgeving. Maar omdat de testcondities zeer extreem zijn in vergelijking met normale museumomstandigheden zal *NH+Kynar* de gevolgen van de oxidatie van sulfidenmonsters zeker tot een minimum beperken. Naast de afzondering van dergelijke monsters van hun omgeving is de belangrijkste eigenschap van het gebruik van een kunsthars dat de natuurlijke porositeit van de monsters sterk verlaagd wordt: daardoor verkleint het oppervlak dat kan reageren met de atmosfeer en dus ook de mogelijkheid tot neerslaan van water (als laagjes of als druppeltjes).

## Dankbetuigingen

De auteurs bedanken O. Vaselli en P. Rossi voor de chemische en colorimetrische analyses, en P. Parrini, E. Pecchioni en G.

Gambassi voor monstervoorbereiding, röntgenanalyse en chemische analyse. Het manuscript werd verbeterd door opmerkingen van M. Mellini, K.U. Schürmann en een anonieme beoordelaar.

## Literatuurverwijzingen

Howie, F.M. (1992): The care and conservation of geological material: minerals, rocks, meteorites and lunar finds. Butterworth Heinemann, Oxford, 138 p.

Lattanzi, P.F., Benvenuti, M., Costagliola, P., Tanelli, G. (1994): An overview on recent research on the metallogeny of Tuscany, with special reference to the Apuane Alps. *Mem. Soc. Geol. Ital.*, **48**, 613-625.

Scott, D.A. (1990): Bronze disease: a review of some chemical problems and the role of relative humidity. *J.A.I.C.*, **29**, 193-206.

## Literatuur over hetzelfde onderwerp in *Gea*

Vol. 16 (1983), 47-48: J. Stemvers-van Bommel: Ammoniet of melanterioriet?

Korte tekst over het bewaren van gepyritiseerde ammonieten van de Boulonnais door ze te behandelen met petroleum + paraffine. Vol. 20 (1987), 80-81: E.A.J. Burke: Hoe houd ik mijn pyriet heel? Overzichtsartikel over de mogelijke oorzaken van het verval van pyriet. Interessant is dat onderzoek van Howie in 1977 dezelfde

drempelwaarde voor aantasting door relatieve vochtigheid in de lucht hanteert als in het artikel van Costagliola en co-auteurs, namelijk 60 %. Later heeft Howie daar 30 % van gemaakt. Het volgende artikel (van Van Veen) maakt het verschil tussen die 60 en 30 % duidelijk.

Vol. 29 (1996), 64-68: J.C. van Veen: Behandelingsmethoden tegen pyriet-verval.

Overzichtsartikel over het verval van pyriet, en de methoden om dit tegen te gaan. Een aantal middelen passeren de revue: lakken, harsen, siliconenolie, paraffine in petroleum, chemische behandelingen, bewaaromstandigheden.

Vol. 29 (1996), 80-81: J. Stemvers-van Bommel: Wissant-ammonieten als chemische tuin.

Illustratie (met kleurenfoto's) van de vervalproducten van pyriet.

## Waar zijn de harsen te verkrijgen?

De *NH* en *Kynar* harsen zijn gepatenteerd door SIREMONT, een dochteronderneming van het bekende MONTEDISON chemische complex, maar de harsen zijn nog niet in de handel. SIREMONT stelt beide harsen op verzoek wel ter beschikking van zowel publieke organisaties (musea etc.) als privé-personen. Geïnteresseerden kunnen contact opnemen met Dr. Piero Tiano van het CNR (Centro Nazionale delle Ricerche) in Firenze; zijn e-mail adres is tiano@cscoa.fi.cnr.it.

---

# Het Pélé-model:

## Invloed van vulkanen op klimaat en leven op aarde

door Drs. W.C.P. de Vries

---

Grote wolken vulkanisch gruis of, vergelijkbaar daarmee: de enorme roetwolken die door de brandende oliebronnen van Koeweit ontstonden, zijn een angstaanjagend gezicht. De dag verandert bij toverslag in diepe nacht. Vulkanische stofwolken staan de laatste tijd zeer in de belangstelling, zoals trouwens alle mogelijke effecten van natuurlijke en menselijke processen die verband houden met eventuele klimaatveranderingen en met veranderingen in de levensomstandigheden van vele aardbewoners.

Vulkanische erupties brengen vooral grote hoeveelheden van het zogenaamde 'broeikasgas' CO<sub>2</sub> in de atmosfeer en ook grote hoeveelheden waterdamp. Waterdamp is een nog veel efficiënter broeikasgas dan koolzuurgas! Dit zijn producten die kunnen leiden tot een opwarming van het klimaat. Daarnaast wordt een belangrijke invloed toegekend aan stofdeeltjes; stof in de hogere niveaus van de aardse dampkring houdt de zonnestraling tegen en zorgt dus voor een tegengesteld effect: een afkoeling van het klimaat.

Zolang stof- of roetwolken, afkomstig van vulkanen, grote branden of een meteorietinslag in de lagere niveaus van de atmosfeer (in de troposfeer) blijven hangen en niet de hoogte van de stratosfeer (waar geen wolken zijn om het stof op te nemen) bereiken, is hun effect op wat langere termijn op het klimaat nihil. Het stof zakt na vrij korte tijd naar het aardoppervlak terug; regens spelen daarbij een belangrijke rol. Klimaatseffecten van iets langere duur, bijvoorbeeld tot enkele jaren, treden wel op wanneer het stof in veel hogere lagen terecht komt: in de stratosfeer. Stofdeeltjes in de stratosfeer houden een deel van de zonnestraling van

af, maar laten de lang-golvige warmtestraling die van het aardoppervlak terugkomt vrijwel ongemoeid. Hierdoor zal afkoeling van het aardoppervlak optreden en een opwarming van de stratosfeer. Een afkoeling door een zeer grote eruptie is voorgekomen bij grote uitbarstingen (zoals die van de Tambora in 1815), hoewel de merkbare effecten veelal beperkt zijn gebleven tot een korte periode, maximaal enkele jaren. Meestal kan echter een afkoeling in de maanden volgend op een grote vulkanische eruptie niet of nauwelijks worden aangetoond, het is vaak niet mogelijk deze korte-termijneffecten te scheiden van de normale wisselingen van het weer. Er zijn wel indirecte effecten gevonden: door een geringe afkoeling veranderen circulatiepatronen in de atmosfeer. Deze veranderingen zijn de voornaamste aanleiding tot een koudere winter met veel stormen en een koele zomer met veel regen.

Een tegengesteld effect geeft de toestroom van het CO<sub>2</sub>-gas in de atmosfeer. Deze kan leiden tot hogere temperaturen aan het aardoppervlak. Het resultaat van de combinatie van deze effecten is bij grote vulkanische erupties in het recente verleden slechts zeer moeizaam en weinig overtuigend aan te tonen.

In de loop van de geologische geschiedenis is de hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de atmosfeer bepaald niet constant gebleven, we kennen periodes van veel hogere gehalten. Gedurende het overgrote deel van zowel het Paleozoïcum als het Mesozoïcum was het gehalte aan koolzuurgas veel hoger dan tegenwoordig. Zo was de gemiddelde hoeveelheid CO<sub>2</sub> in de atmosfeer tijdens het Mesozoïcum vier maal de huidige hoeveelheid; in het Krijt was het koolzuurgasgehalte zelfs zes tot mogelijk tien maal zo hoog als tegenwoordig.