

fer wordt van haaien of roggen, dan is wel duidelijk wie hier de jager is en wie de prooi.

Dankwoord

We danken nogmaals iedereen die meegeholpen heeft aan de totstandkoming van de expositie 'HAAL'.

Referenties

- Duffin, C.J. & Reynders, J.P.H. (1995). A fossil chimaeroid from the Grönsveld Member (Late Maastrichtian, Late Cretaceous) of northwest Belgium. *Belgian Geological Survey, Professional Paper*, 278 [Elasmobranchs et stratigraphie], 111-156.
- Faujas de Saint Fond, B. (1799-1803). *Histoire naturelle de la Montagne de Saint-Pierre de Maëstricht*, 263 pp. H.J. Jansen, Paris.
- Herman, J. (1977). Les sélaciens des terrains néocrétacées et paléocènes de Belgique & des contrées limitrophes. *Éléments d'une biostratigraphie intercontinentale. Mémoires de l'Explication des Cartes géologiques et minières de la Belgique*, 15 (1975), 5-401.
- Lebrun, P. & Canevet, J.-M. (2017). Des dents de requins fossiles! 3. La lignée du grand requin blanc. *Fossiles, Revue française de Paléontologie*, 29, 25-51.
- Marramà, G., Claeson, K.M., Carnevale, G. & Kriwet, J. (2017). Revision of Eocene electric rays (Torpediniformes, Batomorphii) from the Bolca Konservat-Lagerstätte, Italy, reveals the first fossil embryo in situ in marine batoids and provides new insights into the origin of trophic novelties in coral reef fishes. *Journal of Systematic Palaeontology*, <https://doi.org/10.1080/14772019.2017.1371257>
- Peters, N. (2013). Van reuzenhaai tot *Chalicotherium*. Fossielen uit Mill-Langenboom, 158 pp. Oertijdmuseum De Groene Poort, Boxtel.
- Raad, H. (2016) (red.). Zeeuwse strandfossielen. Fauna zeelandica in de oertijd. 144 pp. Werkgroep Geologie KZGW, Middelburg.
- Vullo, R., Guinot, G. & Barbe, G. (2016). The first articulated specimen of the Cretaceous mackerel shark *Haimirichia amonensis* gen. nov. (Haimirichidae fam. nov.) reveals a novel ecomorphological adaptation within the Lamniformes (Elasmobranchii). *Journal of Systematic Palaeontology*, 2016, 1-22.
- www.blueshark.be
- www.facebook.com/NatuurhistorischMuseumMaastricht
- www.nhmmaastricht.nl/exposities/haal.html
- www.shark-references.com

Het geheim van Romeins cement: tobermorië

door A.J. (Tom) van Loon
Valle del Portet 17, 03726 Benitachell, Spanje
Geocom.VanLoon@gmail.com



Afb. 1. Het Romeinse aquaduct bij Caesarea heeft, ondanks blootstelling aan zeewater, de tand des tijds grotendeels overleefd.
Foto: Wikimedia Commons/Chmee2 via CC-BY-3.0.

In moderne gebouwen mag dan vaak sprake zijn van voortijdige schade door slecht cement in het voegwerk, de Romeinen hadden al kustconstructies waarvan het cement alleen maar sterker werd met de tijd. Hun 'geheim' was het gebruik van grondstoffen waarin aluminiumhoudend tobermorië werd gevormd.

De Romeinse auteur Plinius de Oudere, van wie nog steeds veel gymnasiasten teksten te lezen krijgen, schreef omstreeks het jaar 79 zijn boek *Naturalis Historia*. Daarin vermeldde hij dat constructies in Romeinse havens die voortdurend waren blootgesteld aan de werking van het zoute zeewater op den duur ver-

anderen in “één enkele stenen massa, ondoordringbaar voor de golven en met de dag sterker wordend”. Dat was zeker niet overdreven, want veel van dergelijke constructies hebben de tand des tijds zelfs tot nu toe grotendeels doorstaan (afb. 1). Merkwaardig is inderdaad dat deze constructies, indien zij werden blootgesteld aan zeewater, steeds sterker werden en zelfs nu vaak nog sterker zijn dan toen ze ca. tweeduizend jaar geleden werden gebouwd. Dat moet voor moderne bouwers een sprookje lijken. Dit ‘sprookje’ blijkt een mineralogische verklaring te hebben, zo bleek uit onderzoek door de geologe Marie



Afb. 2. Tobermoriet afkomstig uit Concepción del Oro (Mexico). Het getoonde stuk meet ca. 4x2 cm.
Foto: Rob Lavinski.

Jackson (Universiteit van Utah) en haar team. Ze bestudeerde de minerale componenten en de structuren van Romeins cement onder de microscoop, en ontdekte dat het contact met zeewater - dat door de poriën van het cement sijpelt - leidt tot de groei van met elkaar vergroeiende mineralen, die het beton extra samenhang verschaffen.

Ontstaan van tobermoriet

Het mineraal tobermoriet ($\text{Ca}_5\text{Si}_6\text{O}_{16}(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ of $\text{Ca}_5\text{Si}_6(\text{O},\text{OH})_{18} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (afb. 2 en 3) dat zo'n belangrijke rol speelt bij het Romeinse cement, werd door Marie Jackson ontdekt toen ze boorkernen van Romeinse havenconstructies onderzocht (afb. 4). Het bleek om een aluminiumrijke variëteit van dit mineraal te gaan. Nader onderzoek toonde aan dat deze variëteit van het mineraal ontstond tijdens een puzzolane reactie in kalkdeeltjes; dit gebeurde bij licht verhoogde temperatuur. Een verrassende vondst, want het maken van deze variëteit in een laboratorium blijkt zeer moeilijk: niet alleen zijn daarvoor sterk verhoogde temperaturen nodig, maar zelfs dan blijkt er maar heel weinig van te worden gevormd.

Ander type cement

De Romeinen maakten mortel (metselspecie) door vulkanische as met gebluste kalk [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] te mengen, om daarna brokjes vulkanisch gesteente als vulling toe te voegen. De combinatie van as, water en ongebluste kalk leidt tot wat een zogeheten ‘puzzolane’ reactie (naar de Italiaanse stad Pozzuoli, in de Baai van Napels). Het idee hiervoor moet bij de Romeinen zijn ontstaan doordat vulkanische as in het gebied van Pozzuoli onder invloed van zeewater sterk is gecementeerd, zoals door Plinius werd beschreven. Het cement dat door de puzzolane reactie werd gevormd, lijkt veel op een natuurlijk (fijnkorrelig) conglomeraat. Dit werd door de Romeinen op tal van plaatsen gebruikt,



Afb. 3. Tobermorietkristallen uit Riverside County (California). Foto: RRUFF database (zie Lafuente et al., 2015).



Afb. 4. In het kader van het onderzoekproject ROMACONS werd, met toestemming van Soprintendenza Archeologia per la Toscana, in 2003 een boring gezet in een Romeins kustverdedigingswerk in Portus Cosanus (Toscane). Foto: J.P. Oleson.

zoals voor het Pantheon (afb. 5) en de Markt van Traianus in Rome, maar ook in andere delen van het Romeinse Rijk, zoals voor het aquaduct in Caesarea (Israël) (afb. 1). Dit type cement werd echter vooral in havens toegepast, waar de sterk gecementeerde pieren en kades hierdoor veilige ankerplaatsen in beschut water boden.

Portland cement.

Het verschil met ‘modern’ cement (het zogeheten Portland cement, dat nu wereldwijd het meest gangbaar is) is dat voor de vulling hiervan vooral grind en kwartsrijk zand wordt gebruikt. Kwarts reageert echter niet met zeewater, zodat de constructie in de loop van de tijd niet sterker wordt. Integendeel, verontreinigingen in het zand en grind kunnen leiden tot gelvorming; de gels zetten uit en veroorzaken barsten in het cement. Volgens Jackson komt deze gelvorming overal ter wereld voor en is het een van de belangrijkste oorzaken van het verval van constructies die gemaakt zijn met Portland beton of gevoegd met Portland cement. De vergroeiingen (afb. 6) die optreden tussen de vulkanische vulstoffen en de mortel van het Romeinse cement, verhinderden dat barstjes kunnen doorlopen, terwijl de inactiviteit van kwarts en mortel de scheurvorming juist bevordert. Dat roept de vraag op waarom er niet vaker gebruik gemaakt wordt van de veel duurzamere manier waarop de klassieke Romeinen cement maakten. Het antwoord is eenvoudig: met de val van het Romeinse rijk verdween ook deze kennis.



Afb. 5. Ook het Pantheon in Rome kon, mede dankzij het sterke cement, de eeuwen trotseren. Foto: Wikimedia Commons/Dnlor01 via CC-BY-SA 3.0.

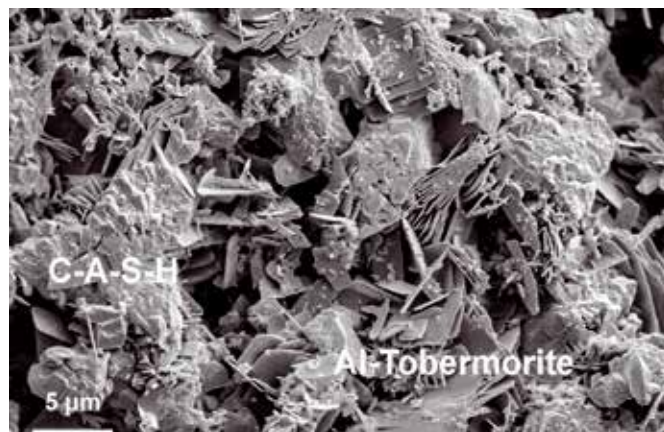
De 'geheime' werking

Verder onderzoek van Jackson wees vervolgens uit dat het Al-tobermoriet samen met de zeoliet phillipsiet $[(Ca,Na_2,K_2)_3Al_6Si_{10}O_{32} \cdot 12H_2O]$ ontstond in zowel puimsteen-deeltjes als poriën in de matrix van het cement. Het onderzoeksteam wist echter van eerder onderzoek dat de puzzolane reactie zelf het Romeinse cement slechts korte tijd verbeterde. Er moest dus ook een ander proces optreden, dat ervoor zorgde dat de diverse mineralen met elkaar bleven vergroeien bij lage temperatuur nadat het cement was uitgehard. Zoals Jackson verzuchtte: "Niemand heeft ooit tobermoriet bij 20 °C kunnen maken - oh ja, behalve de Romeinen". De vraag was hoe diagenetische processen de levensduur van Romeins beton konden verlengen. Uit het onderzoek bleek dat, wanneer zee-water door het cement in de golfbrekers en pieren bewoog, sommige bestanddelen uit de vulkanische as werden opgelost. Daardoor kwamen de 'grondstoffen' vrij uit de sterk basische uitlogingsvloeistof, en vervolgens werden uit die grondstoffen Al-rijk tobermoriet en phillipsiet gevormd. De nieuw gevormde kristallen van het Al-tobermoriet zijn plaatvormig en hebben zo-

veel gemeen met de Ca-Al-Si-OH-bevattende componenten in de vulkanische vulling van het cement, dat ze daarmee vergroei-den (afb. 6), waardoor het cement werd versterkt. Jackson wijst er in dit verband op dat inwerking van zeewater hier - net als elders - als een corrosieproces moet worden beschouwd. In het geval van het Romeinse cement werkte de corrosie echter - in tegenstelling tot wat tot nu toe van corrosie bekend was - niet destructief maar juist versterkend! Bouwkundige kennis die verloren ging met de val van het Romeinse rijk - en waarvan de huidige maatschappij zeker kan profiteren - is nu door dit mineralogisch onderzoek opnieuw beschikbaar gekomen.

Referenties

- Jackson, M.D., Mulcahy, S.R., Chen, H., Li, Y., Li, Q., Cappelletti, P. & Wenk, H.R., 2017. Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete. *American Mineralogist* 102, 1435-1450.
- Lafuente, B., Downs, R.T., Yang, H. & Stone, N., 2015. The power of databases: the RRUFF project. In: Armbruster, T. & Danisi, R.M. (Eds): *Highlights in mineralogical crystallography*. W. de Gruyter (Berlin), 1-30.



Afb. 6. Plaatvormige kristallen van Al-tobermoriet zijn vergroeid met het Ca-Al-Si-OH-rijke vulkanische vulmateriaal (C-A-S-H) in het cement van een Romeinse kustconstructie. Foto: Marie Jackson.