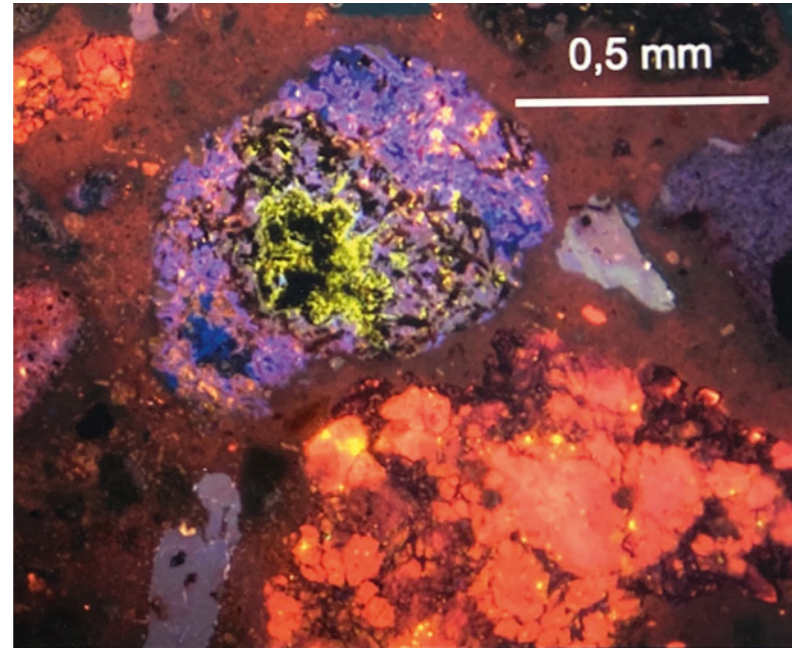


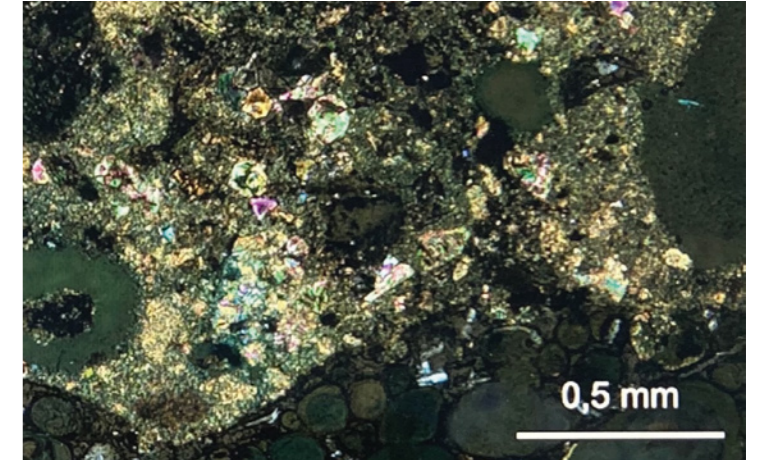
1a



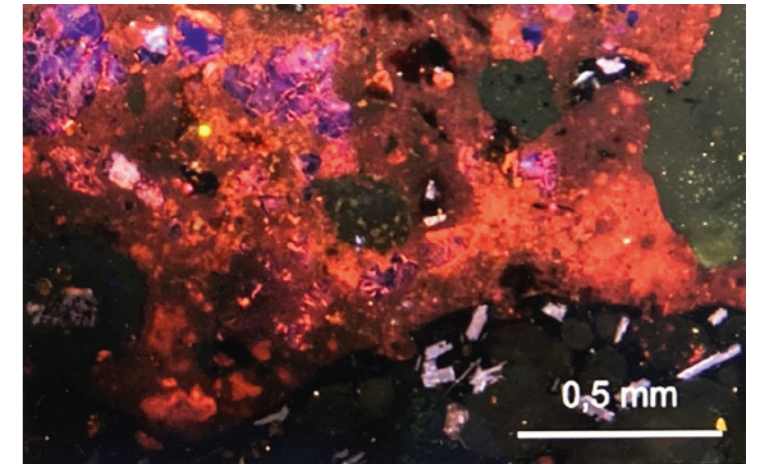
1b



2a



2b



2c

1

Kalk kann mehr!

Auf dem richtigen Weg. Aber auch auf dem richtigen Pfad?
Neue Studie zu römischen Mörteln

Im Januar ging eine neue Studie zu römischen Mörteln viral. Unter dem Titel „Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete“ veröffentlichte eine Forschungsgruppe unter Linda M. Seymour vom Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, neue Beobachtungen an hydraulischen römischen Mörteln und Experimente zum Rissheilungsverhalten durch sekundäre Calcit-ausfällung.¹

Auf Internetportalen und den sozialen Medien überschlug sich die Fachwelt geradezu, so heisst es z.B. dass der „Zusatz von Branntkalk machte antiken Mörtel haltbar und selbstheilend“, oder „Le béton romain, secret de la longévité des structures antiques“, und an anderer Stelle „Riddle solved: Why was Roman concrete so durable? An unexpected ancient manufacturing stra-

tegy may hold the key to designing concrete that lasts for millennia.“ Auch auf den VDR-Steintagen in Wolfenbüttel wurde auf die Veröffentlichung in einem Vortragsbeitrag eingegangen.

In der Studie wird sich auf kleine weiße „Bröckchen“ konzentriert, die in der Vergangenheit häufig als Zuschlagkörner missinterpretiert wurden. Bei diesen handelt es sich um, im deutschsprachigen Raum als „Kalkspatzen“ bekannte, Kalkakkumulationen die wertvolle Hinweise auf den Herstellungsprozess geben (Abbildung 1).

¹ Linda M. Seymour, Janille Maragh, Paolo Sabatini, Michel Di Tommaso, James C. Weaver, Admir Masic (2023), Hot mixing: Mechanistic insights into the durability of ancient Roman concrete. *Science Advances* 9, 10.1126/sciadv.add1602, 6 January 2023, S. 1–13.

1

Ein historischer Kalkspatzenmörtel a) im polarisiertem Licht und b) unter Kathodolumineszenz, was den Calcitanteil deutlich in rot erkennbar macht.

2

a) Freiliegendes ruinöses Mauerwerk an der Avan-Kathedrale in Yerevan/Armenien gibt einen Blick in die beschriebene Bauwerksstruktur frei. b) Der hydraulische Verfüllmörtel im polarisierten Licht und c) unter Kathodolumineszenz. Die deutlich rötliche Mörtelmatrix spricht für die Ausbildung von Calcium-Silikathydrat-Phasen (C-S-H). Bei den geglätteten Bereichen in den Mauerwerkszwickeln handelt es sich um einen Kalkspatzen-Restaurierungsmörtel aus den 1960er Jahren.

ABSTRACT

Lime can do more!

**On the right path. But also on the right path?
New study on Roman mortars .**

„Die Ergebnisse dieser Analysen liefern überzeugende Beweise dafür, dass römischer Mörtel unter Verwendung von Branntkalk anstelle von oder zusätzlich zu gelöschtem Kalk heiß gemischt wurden,“ so die Autoren der Studie.

Aus diesen Erkenntnissen leitet das Forscherteam ab, „dass Kalkklasten mit großer Oberfläche, die bei diesem Prozess entstehen, als Quelle für reaktives Calcium für die langfristige Füllung von Poren und Rissen dienen könnten und somit einen chemisch dominierten intrinsischen Selbstheilungsmechanismus darstellen“.

Soweit so gut. Doch eigentlich ein alter Hut. Auch bei den sogenannten trocken gelöschten Sandkalkmörteln handelt es sich technologisch betrachtet ebenfalls um einen Heisskalkmörtel, insbesondere an den Reaktionszonen in Angrenzung zwischen Kalkoxid und Aggregat. In diesen Mörteln konnten in vielen Beispielen vergleichbare sekundäre Kalkausfällungen in Rissystemen nachgewiesen werden. Diese sekundäre Rissverheilung wurde bereits in den 1950er Jahren beschrieben² und besonders in den letzten 10 Jahren häufig untersucht und die Ergebnisse veröffentlicht.³⁻⁸ Entsprechende trocken gelöschte Sandkalkmörtel, die im ty-

pischen Sandwichverfahren aus geschichtem Sand und gebranntem Kalkstein hergestellt wurden, findet man über den gesamten Globus verteilt, überall dort wo Kalk als Bindemittel im historischen Bauwesen eingesetzt wurde.

Die Autoren der zitierten Studie sehen die Möglichkeit, „dass diese alten Betonkonstruktionspraktiken für die Entwicklung moderner OPC (ordinary portland cement)-basierter Rezepturen angewendet werden können, was weitreichende Auswirkungen auf die verlängerte Lebensdauer von Beton, die langfristige Haltbarkeit und die Nachhaltigkeit“ hätte.

Denn der pH-Wert des Betons wird im Laufe der Zeit zum Neutralpunkt verschoben. Bei einem pH-Wert von 10 oder höher erfährt der Bewehrungsstahl eine Passivierung, d.h. er rostet nicht.

Hierbei wird allerdings nicht beachtet, dass man in der modernen Betontechnologie aktuell auf möglichst dichte Systeme hinarbeitet um den Wassertransport im System zu minimieren und die Stahlkorrosion zu verhindern, der beschriebene „Selbstheilungsmechanismus“ jedoch eine offenporige Struktur benötigt.

Es mutet deshalb unverständlich an, war-

² F. O. Andereg (1942), Autogeneous healing in mortars containing lime, *ASTM Bulletin*, 16, S. 22.

³ K. Callebaut, K. Van Balen (2000), Dry-slakedlime: an alternative binder for restoration mortars. In: 1st International Workshop on Urban Heritage and Building Maintenance VII, Maintenance and strengthening of materials and structures: Plaster, Zürich, S. 65–72.

⁴ Arnaud Coutelas (2003), *Petroarcheologie du mortier de chaux Gallo-Romain – Essai de reconstitution et d'interprétation des chaînes. Operatoires: Du matériau au métier antique*. Dissertation, Université Paris 1.

⁵ Wanja Wedekind, Bernhard Middendorf, Siegfried Siegesmund (2011), Dry slaked mortars and hot lime mortars for the restoration of historical monuments and stone. *Geophysical Research Abstracts* Vol. 13, EGU2011-11717, 2011 EGU General Assembly 2011, Wien.

⁶ J. Engel (2007), Kalkmörtel ist nicht gleich Kalkmörtel – Eigenschaften von Kalkmörtel, in: Remmers Bautenschutz GmbH (Hg.): *Fassadenschutz und Baudenkmalpflege*, Remmers Info 8, Lönningen.

⁷ Barbara Lubelli, Timo G. Nijland, R.P.J. Van Hees (2011), Self-healing of lime based mortars: microscopy observations on case studies. *Heron* 56(1), S.75–91.

⁸ Wanja Wedekind (2014), *Schwierige Ruinen – Zur Erhaltung der Ruinen und Felsmonumente an der Unstrut*, in: Siegesmund, S., Hoppert, M., Epperlein, K. (Hrsg.), *Natur – Stein – Kultur – Wein ... zwischen Saale und Unstrut*. Mitteldeutscher Verlag, S. 293–320.



3a



3b

3

a) Der Haufen aus trocken gelöschtem Sandkalkmörtel und b) deutliche Rotverfärbungen des Sandes an der Kontaktzone zwischen Kalk und Sandzuschlag.

um nicht einfach auf Altbewährtes zurückgegriffen wird und zwar auch ganz ohne den heute üblichen Bewehrungsstahl. Als gute Beispiele, die Jahrhunderte und zahlreiche Erdbeben überstanden haben, dienen dafür auch die Bauwerke des armenischen Frühmittelalters. Bei diesen handelt es sich im eigentlichen Sinne um monolithische Schichtmörtelbauten,⁹ wobei der Mauerwerkskern größtenteils aus „Römischen Mörteln“ und

Bruchsteinen besteht, deren Verwendung im Kaukasus im Anschluss an die Antike offenbar eine materialtechnische Renaissance erfahren hatte (Abbildung 2, ¹⁰). Entsprechende Mörtel findet man jedoch auch im gesamten anatolischen Kulturraum wo Tuffstein oder andere Vulkanite anstehen.¹¹

Die aktuellen Untersuchungen unterstreichen die potentielle Innovationskraft der historischen Materialkunde, also auch der Restaurierung. Natürlich sind historische Heiskalkmörtel nicht für alle Gebäude- und Bauwerkstypen anwendbar, aber sie könnten, ähnlich der armenischen Architektur, für tragende Wände und kompaktere Gebäudetypen auch im modernen Hausbau eingesetzt werden. Die verhältnismäßig hohe Porosität und der günstige w-Wert des Mauerwerksystems würden darüber hinaus eine Dämmung überflüssig machen. Eigene Untersuchungen an armenischen Mörteln aber auch an originalem Opus Caementicium aus Rom haben Porositäten zwischen 17 und 30 % ergeben.¹⁰

Es ist jedoch zweifelhaft ob das Selbstheilungspotential der Kalkspatzen den „key to

designing concrete that lasts for millennia“ ausmacht oder ob es nicht vielmehr die hydraulischen C-A-S-H (Calcium-Aluminium-Silikat-Hydrat) Verbindungen sind, die für die Langlebigkeit historischer Mauermörtel und der aus ihnen errichteten baulichen Strukturen, verantwortlich zu machen sind.

Diese bilden die im eigentlichen Sinne hydraulischen Verbindungen der Mörtelmatrix, denen in der gehypten Publikation jedoch kaum Aufmerksamkeit geschenkt wird. Entsprechende Phasen werden hauptsächlich aus Calciumhydroxid und amorphem silikatischem Material (Tuff) gebildet.

Hier gehen die Autoren der Studie davon aus, dass gemäß früherer Belege „die Kalkrelikte im Laufe der Zeit mit anderen Mörtelbestandteilen reagieren und sowohl amorphe (C-A-S-H) als auch kristalline (z. B. Al-Tobermorit und Strätlingit) Phasen bilden können“¹², also entsprechende Verbindungen angeblich durch langfristige Bedingungen und nicht durch den Herstellungsprozess verursacht werden.

Doch der eigentliche Clou ist, dass sich die Löslichkeit des amorphen Silikats enorm steigern lässt wenn es zum einen einer hohen Temperatur und zum anderen einem hohen pH-Wert ausgesetzt ist. Auch das ist ein alter Hut und gilt als Grundwissen der Silikatchemie.¹³ Beide Zustände liegen beim „Hot-Mixing“ vor, also eine hohe Temperatur und der maximal zu erreichende pH-Wert von 14. Doch lediglich die erhöhte Temperatur wird von den Autoren der zitierten Studie

⁹ Josef Strzygowski (1918), Die Baukunst der Armenier und Europa. Wien.

¹⁰ Wanja Wedekind, Emma Harutyunyan, Siegfried Siegesmund. The cathedral-ruins of Zvartnots and Avan (Armenia) – A comparative study on decay and restoration, in: Siegesmund, S. & Middendorf, B. Monument Future: Decay and Conservation of Stone. Proceedings of the 14th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Volume I, Mitteldeutscher Verlag 2020, S. 137–144.

¹¹ Burcu Tasci (2021), Properties of Lime Binders and Aggregates of Roman Mortars in Western Anatolia. PhD-Thesis, Graduate School of Engineering and Sciences of Izmir Institute of Technology.

¹² M. D. Jackson, S. R. Mulcahy, H. Chen, Y. Li, Q. Li, P. Cappelletti, H.-R. Wenk (2017), Phillipsite and Al-tobermorite mineral cements produced through low-temperature water-rock reactions in Roman marine concrete. Am. Mineral. 102, S. 1435–1450.

¹³ R. K. Iler (1979), The Chemistry of Silica, Wiley, Interscience, New York.

¹⁴ D. Jackson Marie, R. Chae Sejung, R. Mulcahy Sean, C. Meral, R. Taylor, P. Li, A.-H. Emwas, J. Moon, S. Yoon, G. Vola, H.-R. Wenk, J. M. Monteiro Paulo (2013), Unlocking the secrets of Al-tobermorite in Roman seawater concrete. Am. Mineral. 98, S. 1669–1687.

¹⁵ Wanja Wedekind (2003), Ein Pflege- und Konservierungsplan der antiken Entwässerungssysteme zum Schutz der Felsfassaden in Petra/Jordanien. Diplomarbeit im Fach Restaurierung und Konservierung von Steinobjekten, Fachhochschule Hildesheim/ Holzminnen/Göttingen – Institut für Restaurierung, Petra/Göttingen.

am Rande erwähnt. Hier heisst es: „Frühere thermodynamische Modellierungen der Puzzolanreaktion (Hydratation) in römischem Meeresbeton haben ergeben, dass in dicken Betonstrukturen Temperaturen von bis zu 97 °C allein durch die Puzzolanreaktion möglich sind.“¹⁴ Es müsste also darum gehen, eben diese Herstellungsbedingungen nachzuvollziehen, bei denen sich portlandzementfreie C-A-S-H- bzw. C-S-H-Verbindungen erzeugen lassen. Doch ist fraglich, ob sich entsprechende Versuche im Labormaßstab nachstellen lassen, da sich dabei, wie eigene Untersuchungen¹⁵ zeigten und auch die Autoren der zitierten Studie bemerken, lediglich Temperaturen von rund 60°C erreichen lassen. Diese reichen wahrscheinlich nicht aus um einen verstärkten Lösungsprozess des amorphen Silikats in Gang zu setzen. Für das Nachstellen einer entsprechenden Reaktion sind wahrscheinlich Großversuche notwendig, die weit über den Labormaßstab hinausreichen. Durch eigens durchgeführte, begleitende Untersuchungen bei der Herstellung von trocken gelöschten Sandkalkmörteln, konnten im ca. 1,50m hohen, isolierten Mörtelhaufen Temperaturen von bis zu 320°C gemessen werden (Abbildung 3a). An der Kontaktzone zwischen Kalk und Sandzuschlag kam es hierbei zu einer deutlichen Rotverfärbung durch Eisenoxidation (Abbildung 3b). Entsprechende Großversuche im

Rahmen der experimentellen Restaurierung und historischen Materialforschung wären sicherlich ein lohnendes Thema. Die Restaurierung hätte hier die Chance wichtige Beiträge zur nachhaltigen Erhaltung der Lebensumwelt und Impulse für ein klimagerechtes Bauen zu liefern.

Denn die historischen Betone der römischen Antike und des armenischen Frühmittelalters kommen ohne den harten Portlandzementklinker aus, der energieaufwändig aufgemahlen werden muss. Portlandzement ist ein faszinierender Baustoff und hat den Stahlbetonbau der Moderne erst möglich gemacht. Das Problem ist nur, dass dieses energieaufwändig hergestellte Material im heutigen Bauwesen geradezu inflationär eingesetzt wird.

Durch ein „neues altes Bauen“ mit neuen aber traditionell hergestellten Materialien liessen sich rund 70% der Produktionsenergie für hydraulische Bindemittel einsparen. Das aktuelle Bauwesen wäre nicht mehr der Klimakiller Nr. 1, sondern hätte sich die Bezeichnung einer gewissenhaften Baukultur verdient, die sich die Innovationen der Baugeschichte, einer Geschichte jahrtausendealter empirischer Forschung und Optimierung, im Interesse einer nachhaltigen und Ressourcen schonenden Lebensweise zu nutze macht.

Dr. Wanja Wedekind

Vita

Wanja Wedekind ist Stuckateur, Diplom-Restaurator, Fachkraft im Lehm- und Ziegelbau und hat in den Geowissenschaften promoviert. Derzeit arbeitet er für das KulturGutRetter-Projekt des Deutschen Archäologischen Instituts, ist Lehrbeauftragter an der TU-Berlin und ist als Berater für die UNESCO tätig. Mit Applied Conservation Science (ACS) ist er in Deutschland und international in Restaurierungsprojekten in der Forschung und der Kompetenzbildung aktiv.

KULTURGUTRETTUNGS-CONTAINER

Wir gestalten Kulturguterhaltung

- IPM-Freezer - adaptives Gefrierverfahren gegen Schädlinge
- Klimastabile Lagerung für sensibles Kunst- und Kulturgut
- Quarantäne, Kapselung und Versorgung von kontaminierten Sammlungen

www.iconyk.de
info@iconyk.de
tel.: +49 172 189 2271