

Römischer Mörtel

Zusammenfassung

Die Römer verwendeten bei der Herstellung ihres Mauermörtels Tuff aus Pozzuoli und der Eifel (Raum Kruf, Neumagen) als Bindemittel. Dadurch erhielten sie einen sehr dauerhaften Mörtel, weil er eine Druckfestigkeit hatte, die nahezu an moderne Mörtel heranreichte. Nach Zusammenbruch des römischen Reiches und in den Wirren der Völkerwanderungszeit ging das Wissen um die recht komplizierte Bereitung des Mörtels verloren. Erst mit Beginn der Gotik kam ein ähnlich haltbarer Mörtel auf. Wenn sich in einer Mörtelprobe aus einem alten Mauerwerk Tuff nachweisen lassen würde, wäre eine verlässliche Zuordnung zur Römerzeit möglich. Bisher haben chemische Analysen von Mörtelproben keine brauchbaren Aussagen erbracht, da in Tuff kein charakterisierendes chemisches Element vorhanden ist. Tuff wird noch heute in Portlandpuzzolanzement (Trasszement) von der Bauindustrie verwendet. Für gutachterliche Aussagen zur Verwendung von Tuff wurde dem entsprechend eine mineralogische Bestimmungsmethode erarbeitet. Diese Methode könnte auch von der Archäologie genutzt werden.

Altes Mauerwerk

Die Zuordnung von Mauerresten oder Bauwerken in die römische oder in die karolingische Zeit erfordert besonderen Sachverstand. Erste Anhalte geben die Steinsetzung und der Verwendungszweck, aber vielfach bleiben noch Zweifel. Weitere Aussagen könnten aus Mörtelproben gewonnen werden. Jedoch haben chemische Analysen kein Unterscheidungsmerkmal erbracht, das in irgendeiner Weise charakteristisch für eine der Epochen sein könnte.¹

Opus Caementitium

Die Römer verwendeten für ihren Mörtel neben gebrannten, fein gemahlten Kalk, Ziegelklein bzw. Ziegelmehl, Tuff und örtlich verfügbare Zuschlagstoffe, wie Sand und feinen Kies. Sie bezeichneten diese Mörtelmischung mit „opus caementitium.“² Zur karolingischen Zeit gebrauchte man gebrannten und gelöschten Kalk und ebenfalls örtliche Zuschlagstoffe. Das Wissen um die hohe Bindekraft des römischen Mörtels war verloren gegangen.

Die Erfahrung mit dem Tuff brachten die Römer aus Italien mit. In der Nähe der Stadt Pozzuoli (lateinisch: Puteoli), wenige Kilometer vom Vesuv und Neapel entfernt, hatten sie klein gemahlene Tuff als Zuschlagstoff verwendet und festgestellt, dass damit ein über Jahrhunderte haltbarer, harter Mörtel entstand. Die (Druck-) Festigkeit, als Kriterium für die Härte dieses Baustoffes, kommt an die des modernen Zements nahezu heran.

Eine etwas schwächere Bindekraft des Mörtels entwickelt ein Gemisch aus Ziegelmehl und Kalk. Der beim Brennen von Dach- und Mauerziegeln entstehende Bruch wurde klein geschlagen und zu Ziegelmehl vermahlen. Wahrscheinlich wurden auch Ziegel eigens dafür gebrannt.

Der Tuff von Pozzuoli wurde über weite Strecken transportiert, um Bauten z. B. in Rom errichten zu können. Hafenanlagen, wie in Ampurias / Spanien³, haben bis heute der Erosion durch die Wellen des Mittelmeeres standgehalten. Je weiter die Transportwege waren, um so eher tendierten die Bauleute dazu, das durch den Transport wertvolle Material Tuff wenigstens teilweise durch Ziegelmehl zu ersetzen.⁴

Während ihrer Anwesenheit im Rheinland fanden die Römer bei Neumagen und weiter in die Eifel hinein den dort anstehenden Tuff aus dem Eifelvulkanismus.⁵ Er eignet sich für Mörtel ebenso gut wie das Material aus Italien.

Karolingischer Mörtel

In den Wirren der Völkerwanderungszeit und innerhalb der Zeitspanne von ca. 500 Jahren bis zur karolingischen Zeit war das spezielle Wissen der Römer für die Herstellung eines dauerhaften Mörtels verloren gegangen. Ob die Vermutung zutrifft, dass deutsche Kaiser aus Italien Bauleute holen ließen, um für ihre Bauten das überlieferte Wissen der Römer zu nutzen, bedarf einer Verifizierung. Zumal die Handwerker für ein dauerhaftes Mauerwerk auch den Tuff aus Pozzuoli benötigten. Woher sollten sie wissen, dass aus der Eifel auch ein guter Baustoff geholt werden konnte? Damit stellt sich die Frage nach dem Transport über die weite Strecke und ob dieses Wissen um den Wirkeffekt dieses Materials in Italien noch vorhanden war.

In der karolingischen Zeit baute man mit gebrannten, gelöschten Kalk vermischt mit feinem Sand. Um die Bindekraft zu erhöhen, setzte man organische Substanzen zu, wie Quark, Eiweiß, Knochenleim usw. Eine dauerhafte Bindekraft des Mörtels entstand nicht auf diese Weise, weil diese organischen Bestandteile verwesten. Aus der Luft kam Kohlensäure (CO₂) hinzu, die im Regenwasser gelöst war.⁶

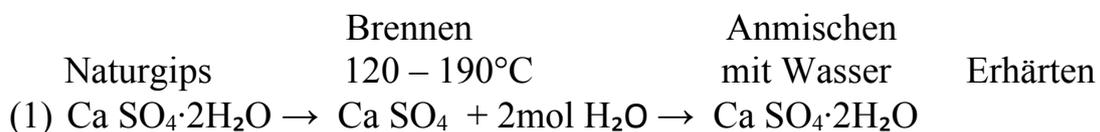
Der Kalk im Mörtel verwitterte langsam durch Aufnahme von Wasser und Kohlensäure und setzte sich dabei zu Calciumhydrogencarbonat um. Wurde das Mauerwerk nicht ausreichend vor Regen geschützt, löste sich das Calciumhydrogencarbonat im stetig durchsickernden Wasser auf und wurde ausgeschwemmt. Calciumhydrogencarbonat $[\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2]$ ist wasserlöslich und gehört zu den Salzen in unserem Trinkwasser, die als Härtebildner bezeichnet werden. Die karolingischen Bauten verloren auf diese Weise schon bald ihre Festigkeit. Die Bauleute versuchten daher mit sehr dicken Mauern und ganz kleinen Fenstern die Standfestigkeit der Bauten zu erreichen, um die mangelhafte Bindungsfähigkeit des Mörtels auszugleichen. Trotzdem mussten häufig Restaurierungen vorgenommen werden. Bei diesen Restaurierungsarbeiten vom frühen Mittelalter an wurden aber die haltbareren Mörtel der Gotik und der Folgezeit verwendet.

Hydraulische Baustoffe

Die Bezeichnung „hydraulischer“ Baustoff gebrauchen die Baufachleute als Sammelbegriff für Gips, Kalk und Zement in den verschiedenen Aufbereitungen, weil sie unter Aufnahme von Wasser fest werden. So einfach dieser Begriff zu sein scheint, aus der Sicht des Chemikers laufen dabei verschiedene Vorgänge ab.

Natürlich vorkommender Gips wird bei $120 - 190^\circ\text{C}$ gebrannt (je nach Verwendungszweck auch bei etwas höherer Temperatur⁷), dann fein gemahlen und für den Gebrauch mit Wasser zu einer Paste verrührt. In dieser pastösen Form wird er verarbeitet und erhärtet nach einigen Minuten. Durch Zugabe von Carboxymethylcellulose, einem vielfältig verwendeten Verdickungsmittel, wird das Erhärten hinausgezögert (z.B. Moltofill)⁸.

Der Vorgang läuft nach folgendem Schema ab:

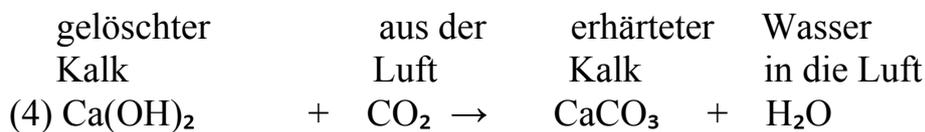
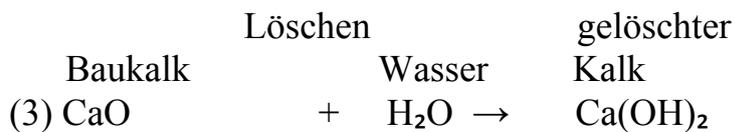
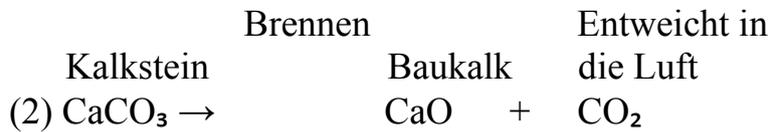


Durch das Brennen wird das Kristallwasser aus dem Gips ausgetrieben. Danach folgt das Mahlen und Sieben. Schließlich bindet das Calciumsulfat einen Teil des Wassers vom Anmischen und erhärtet als Calciumdihydrat mit zwei Molekülen Kristallwasser wieder zu Gips.

Mit einer gewissen Ähnlichkeit läuft der Vorgang bei Kalk ab.⁹ Der natürlich vorkommende Kalkstein wird bei Temperaturen zwischen 1000°C und 1200°C gebrannt. Nach dem Mahlen wird der Kalk mit Wasser gelöscht und kann dann

mit Sand zu Mörtel gemischt werden. Durch Anlagern von CO₂ aus der Luft erhärtet der Kalk.

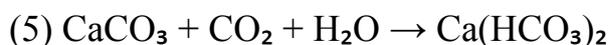
Der Vorgang läuft nach folgendem Schema ab:



Der Kalkstein wird gebrannt und verliert dabei Kohlendioxid an die Luft. Durch das Löschen mit Wasser bildet sich Calciumhydroxid. Erst in dieser Form kann der Baukalk wieder mit dem Kohlendioxid aus der Luft zu Calciumcarbonat reagieren und erhärten. Für diesen Vorgang ist die Anwesenheit von Feuchtigkeit unbedingt erforderlich.¹⁰

Während die chemische Reaktion nach Schema (4) abläuft findet nur in einem sehr geringen Maße eine Bindung des Calciumhydroxides mit dem Siliciumoxid des Gesteines oder der Zuschlagstoffe statt. Die Druckfestigkeit des Mörtels erhöht sich aus diesem Grund selbst nach jahrhundertlanger Lagerzeit nur geringfügig. Die Festigkeit des Kalkmörtels beruht weit überwiegend auf der Härte des gebildeten Calciumcarbonats.

Eine Verwitterung des Mörtels kann auf verschiedene Art erfolgen.¹¹ Die chemische Verwitterung nach Schema (5) setzt die Haltbarkeit des Mörtels stark herab und wird durch Feuchtigkeit im Mauerwerk beschleunigt. Der erhärtete Kalk setzt sich mit weiterem Kohlendioxid der Luft in Gegenwart von Wasser zu dem wasserlöslichen Calciumhydrogencarbonat (alt: Calciumbicarbonat) um und wird vom durchsickernden (Regen-) Wasser aufgelöst und ausgeschwemmt.



Auf Dauer die höchste Festigkeit von Mauerwerk wird durch einen Mörtel erzielt, der Zement enthält. Die Grundlage für die hohe Druckfestigkeit des

Mörtels, seine Verwitterungsbeständigkeit und seine Dauerhaftigkeit ist die Bildung von Calciumsilikat nach Schema (6):



Aus den Bestandteilen des Zements CaO , SiO_2 , Al_2O_3 und Fe_2O_3 (Calciumoxid, Siliciumoxid, Aluminiumoxid, Eisenoxid) entsteht ein vielfältiges Gemisch von Reaktionsprodukten in stets schwankender Zusammensetzung. Daher kann keine exakte chemische Formel genannt werden. Man hilft sich dadurch, dass die Ausgangsprodukte genannt und mit einem Punkt getrennt werden z.B. $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Das Siliciumoxid ist nur in geringen Mengen in Wasser löslich und lagert sich zu sehr festen Kristallen zusammen (z.B. Quarz).¹² An der Oberfläche von Steinen und Sanden ist SiO_2 in reaktionsfähiger Form vorhanden, jedoch kann es nur zu einem Teil direkt mit CaO oder $\text{Ca}(\text{OH})_2$ eine chemische Bindung eingehen. Beim Erhärten des Zementmörtels oder des Betons werden diese außenliegenden SiO_2 -Gruppen nur zu einem kleinen Teil in den Reaktionsprozess mit einbezogen. An der Härte von Beton hat diese Reaktion nur einen untergeordneten Anteil¹³.

Wird ein tonreicher Mergel zunächst bei $1400\text{ }^\circ\text{C}$ bis $1500\text{ }^\circ\text{C}$ bis zur Sinterung gebrannt und dann fein gemahlen, entsteht ein reaktionsfähiges Gemisch. Es kann submikroskopische Kristalle bilden, die bei der Reaktion zum $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ zu wachsen beginnen, miteinander „verfilzen“ und dabei das ganze Mörtel / Mauerwerkgefüge verfestigen¹⁴. Je feiner gemahlen wird, um so schneller kann nachher der Mörtel abbinden. Diesen Effekt nutzt man bei Schnellbinderzement (z. B. Rakofix), der besonders fein gemahlen ist und innerhalb von Minuten einen steifen Mörtel bildet. Die feinere Mahlung legt mehr reaktionsfähige, endständige SiO_2 -Gruppen frei, die eine schnellere Kristallbildung ermöglichen. Die chemische Reaktion zum Calciumsilikat und das Wachstum der feinen Kristalle erfordert eine gewisse Feuchtigkeit. Sie als eine Ionenbindung im wässrigen Medium zu bezeichnen, ist in der Literatur nicht üblich, kommt jedoch dem Geschehen recht nahe. Daher werden der Mörtel und der Beton in den ersten 2 – 3 Tagen der Aushärtungsphase feucht gehalten und vor Austrocknen geschützt.

Heute verwendet man zur Herstellung von Portlandzement (Ugs.: Zement) natürlichen Kalkmergel bzw. ein Rohstoffgemisch aus etwa 78 % Kalkstein (CaCO_3) und etwa 22 % Ton und brennt ihn bei $1400\text{ }^\circ\text{C}$ bis $1500\text{ }^\circ\text{C}$ bis er fast zu sintern beginnt.¹⁵ Danach wird der Zementklinker gemahlen, nach Bedarf mit gebranntem Kalk vermischt und dabei auf ein technisch günstiges

Mischungsverhältnis von CaO zu SiO₂ eingestellt. Diesen künstlich hergestellten Zement kannten die Römer noch nicht.

Trass

In der Vulkaneifel wird noch heute der vulkanisch entstandene Tuff abgebaut und erhält nach dem Mahlen die Bezeichnung „Trass“. Ein sehr haltbarer Mörtel oder Beton kann aus dem Trass mit entsprechenden Zugaben von gebranntem Kalk, dazu noch Sand oder Kies, sowie Wasser hergestellt werden. Die Druckfestigkeit dieser Mischung nach dem Aushärten erreicht nicht ganz das hohe Niveau von Beton aus Portlandzement. Die Feinheit der Mahlung dürfte auch bei diesem Material die spätere Druckfestigkeit und die Geschwindigkeit des Aushärtens wesentlich beeinflusst haben.

Bei der Entstehung von Tuff war das Gestein im glühenden Zustand und erstarrte danach sehr rasch. Die reaktionsfähige Kieselsäure konnte sich dadurch nicht in Form von kristallinen Strukturen abscheiden. Der heute gezielt durchgeführte Brennprozess von Zementklinker hatte im Vulkan stattgefunden, gefolgt von einem relativ schnellen Abkühlen, dabei entstand der Tuff. Zunächst wurde der Tuff wie auch das Ziegelmaterial mit dem Hammer grob zerkleinert. Das Mahlen des Tuffs zum mehlfeinen Pulver konnten die Römer auf den jeweiligen Baustellen mittels der bei ihnen gebräuchlichen Handmühlen für Getreide vornehmen.¹⁶ Der Tuff und auch das Ziegelklein sind so weich, dass daran wohl kaum ein Zweifel aufkommen sollte.¹⁷ Die Getreidemühlen wurden aus dem Basalt der Eifel hergestellt und können in vielen Römermuseen besichtigt werden. Auf der Saalburg hat man zur Demonstration eine große Mühle aufgebaut, die durch ein Göpelwerk angetrieben wird.

Der in der Eifel produzierte Portlandpuzzolanzement (früher: Trasszement)¹⁸ entsteht aus den Komponenten Trass und Zement. Daraus hergestellter Beton zeigt kein oder nur geringes Schwinden beim Erhärten, er behält also seine Maße. Dieser Vorteil wird beim Bau von z.B. Brücken genutzt. Daher wird noch heute dieser Werkstoff verwendet.

Analyse von Portlandpuzzolanzement

Da Portlandpuzzolanzement teurer als normaler Portlandzement einsteht, ist die Versuchung groß, teilweise oder ganz darauf zu verzichten, um Geld zu sparen. Die Bauindustrie hat daher Untersuchungsmethoden entwickelt, um in Streitfällen das Vorhandensein von Trass nachzuweisen. Die Herstellerfirmen z.B. Trasswerke Meurin, 56626 Andernach-Kruft, können in betriebseigenen Labors den Nachweis führen.¹⁹ Als vereidigter Gutachter für die Bauindustrie kann Dr. rer. nat. Klaus Unterderweide²⁰ von der Materialprüfanstalt für das

Bauwesen in Braunschweig tätig werden.

Eine chemische Analyse kann nach Auflösen des Mörtels in Salzsäure die Anteile von Ca, Mg, SiO₂, Al usw. in der Probe angeben. Aber Trass wird dabei nicht erkannt, weil kein charakteristisches chemisches Element dieses Mineral anzeigt. Im Tuff haben sich beim Erkalten nach dem Vulkanausbruch typische Kristalle gebildet.²¹ Nach dem Mahlen zum Trass haben sich noch kleinere Kristalle erhalten, die unter dem Mikroskop zu erkennen sind.

Nach Auskunft von Herrn Schwick (früher Materialprüfanstalt für das Bauwesen in Braunschweig) kann das Mineral „Leuzit“ (früher: Leucit,

$\text{K} [\text{Al Si}_2\text{O}_6]$)²² als Kristall in der charakteristischen Form eines Ikositetraeders zuverlässig erkannt werden und zeigt an, dass es sich um einen Tuff aus der Eifel handelt. Nicht so eindeutig kann das ebenfalls vorhandene, hexagonale Kristall von Nephelin ($\text{KNa}_2 [\text{AlSiO}_4]$)²³ für einen Nachweis herangezogen werden, weil Verwechslungen mit anderen Mineralien möglich sind. Einzelheiten zur Arbeitsmethode gehören zum Know-how dieses kommerziell arbeitenden Prüflabors. Prinzipiell besteht die Bereitschaft, in einer Startphase die Arbeitsmethodik mit entsprechenden Proben aus karolingischen und römischen Bauten zu erarbeiten.

Eine ähnliche Bereitschaft zu einer Zusammenarbeit könnte mit den Trasswerken Meurin nach Zustimmung der Firmenleitung entstehen.

In den frühen Jahren ihrer Anwesenheit in Germanien könnten die Römer noch den Tuff aus Pozzuoli für ihre Bauten herangeschafft haben, bis sie das Material in der Eifel entdeckt hatten. Deshalb ist es denkbar, dass Proben von frühen Gebäuden das Leitmineral nicht enthalten. Sinngemäß gilt diese Möglichkeit auch für den Suevit-Trass aus dem Ries bei Nördlingen, der möglicherweise von den Römern nicht verwendet wurde oder der kein Leuzit enthält. Bei Vorarbeiten könnte das abgeklärt werden.

Ziegelklein

Die römischen Bauleute haben dauerhafte Bauten nicht nur unter Verwendung von Tuff hergestellt, sondern sie verarbeiteten auch Mischungen von Trass mit Ziegelklein (und natürlich gebrannten Kalk nebst Zuschlagstoffen) oder auch nur Ziegelklein (mit Kalk nebst Sand).

Bei Renovierungsarbeiten am Kloster Corvey fand Klages²⁴ ein Häufchen Ziegelklein am Fuß einer Säule unterhalb des Plattenbelages. Allem Anschein nach hatten Bauleute beim Verarbeiten von Mörtel oder Estrich grobe, störende Stücke Ziegelklein ausgelesen, die später durch den anhaftenden Mörtel zu einem kompakten Häufchen erhärteten. Das Ziegelmaterial enthielt einen Anteil

Eisenoxid, der zu der typischen roten Tönung der Ziegelsteine führte. An Mörtelproben auf Seite 233 a.o.O. sind gröbere Körner der Ziegelsteine zu erkennen. Offensichtlich wurde bei diesem Bau professionell Ziegelklein als Mörtelbestandteil verarbeitet. Tuff war in dem Mörtel nicht nachgewiesen worden.

Bei einem Teil des Mörtels, der im ältesten Teil der Klosterbauten verarbeitet wurde, war die charakteristische rote Tönung von Ziegelklein nicht zu erkennen. Dieser Mörtel war jedoch ebenfalls sehr hart und konnte nicht nur aus gebranntem Kalk mit Zuschlagstoffen bestanden haben. Tuff war ebenfalls nicht vorhanden. Am Südrand des nahen Dorfes Höxter-Albaxen existierte an der HansasträÙe eine Ziegelei, die hellgraue Ziegelsteine aus einem Mergelvorkommen herstellte. Solches Ziegelmateriale kann für den Mörtel verwendet worden sein, das nicht durch die rote Farbe des Eisenoxids zu erkennen war. Der Maurerkalk für die Bauten von Corvey wurde nahe der Weinbergskapelle St. Joseph gebrochen und gebrannt in Kalköfen an der Bundesstraße 83, die bis 1915 in Betrieb waren.

Probennahme

Für eine Prüfung, ob Trass oder Ziegelklein als Zusatz zum Mörtel eines Bauwerkes verwendet wurde, kann eine Bohrprobe aus dem Mörtel zwischen den Steinen des Mauerwerkes gewonnen werden. Vorteilhaft ist eine Kernbohrung, bei der ein Kern in Form eines runden „Stabes“ aus Mörtel verbleibt. Dieser „Stab“ kann labormäßig untersucht werden. Eine Bohrung mit einem einfachen Schlagbohrer würde die erwarteten Kristalle zerstören. Eine Probennahme an mehreren (2 – 3 oder mehr) Stellen des jeweiligen Bauwerkes sollte vorgesehen werden, um Zufälligkeiten einzugrenzen.

Bei alten Bauten hat es im Laufe der Jahrhunderte immer wieder Ausbesserungsarbeiten gegeben. Deshalb muss bei der Probennahme gesichert sein, dass die ursprüngliche Bausubstanz erfasst und die entsprechende Bohrtiefe erreicht wird.

Da bisher keine Erfahrungen mit alten historischen Bauten vorliegen, erscheint es sinnvoll, zunächst die Prüfmethode auf ihre zuverlässige Aussage hin an sicher datierten Bauten der Römer und, was noch kritischer zu sein scheint, an solchen der Karolinger zu verifizieren. Besonders bei karolingischen Bauwerken kann nicht in allen Fällen eine Fehldatierung in früheren Jahren und damit eine falsche Zuordnung ausgeschlossen werden. Von Dr. Klaus Grewe, Bonn, wird wahrscheinlich zu erfahren sein, wo an Mörtel von der römischen Eifelwasserleitung heranzukommen ist.

An folgenden Bauwerken könnte eine Kernbohrung zu neuen Erkenntnissen führen:

Hildesheim, Bernwardsmauer: Die bogenförmigen Teile im unteren Teil im Westen der Mauer etwa 50 – 70 cm über dem Boden.

Ingelheim, Wasserleitung und die Fundamentsockel der Säulen der Kaiserpfalz nahe dem Heidesheimer Tor.

Höxter, Kloster Corvey, Ur-Westwerk.

Literatur

Grewe, Klaus: Atlas der römischen Wasserleitungen nach Köln, Köln: Rheinlandverlag, 1986

Holleman, Arnold F. /Wiberg, Egon, Nils: Lehrbuch der anorganischen Chemie, Berlin: Verlag Walter de Gruyter, 1995

Klabes, Heribert: Corvey, eine karolingische Klostergründung an der Weser auf den Mauern einer römischen Civitas, 2.Ausgabe (Nachdruck), Oerlinghausen: Verlag Andreas Otte, 2008

Ladurner, J. /Purtscheller, F.: Das große Mineralienbuch, Innsbruck/Tirol: Pinguin Verlag, 1970

Lamprecht, Heinz-Otto: Opus Caementitium, Bautechnik der Römer, Düsseldorf: Beton-Verlag, 1985

Scholz, Wilhelm /Hiese, Wolfram: Baustoffkenntnis, München: Werner-Verlag, 2003

Anmerkungen

¹ Telefonische Auskunft von Prof. em. Dr. Dr. Ing. Günther Binding am 30.05.2006 (tel. priv. 02204 64956)

Von ihm wurden u.a. ISBN 3-534-10908-2, ISBN 3-534-14248-9, ISBN 3-524-15489-4 herausgegeben.

² Lamprecht, S. 11

³ Lamprecht, S.113 ff

⁴ Diese Vermutung des Autors müsste im Zuge der Untersuchungen überprüft werden.

⁵ Grewe, S. 249ff

⁶ Dieser Umstand, das Einbringen von Kohlendioxid in späteren Jahren durch Regenwasser und die Bildung von Calciumcarbonat bzw. Calciumhydrogencarbonat auch noch viele hundert Jahre später nach Entstehung des Baues, kann bei Datierungen mit der Radiokarbonmethode (C14-Methode) zu falschen Ergebnissen führen. Freistehende Bauten, oder solche mit verfallenen, undichten Dächern und Bauten im Erdreich, wie unterirdische Wasserleitungen, wurden in den Zeiten vor der Probenahme durch Regenwasser in unbekannter Stärke durchfeuchtet, haben Kohlendioxid aus dem Regenwasser in nicht mehr feststellbarer Menge aufgenommen und damit „frischen“ radioaktiven Kohlenstoff eingelagert. Die Datierung nennt dadurch einen zu späten Zeitpunkt der Entstehung des Bauwerkes, weil sie „jungen“ Kohlenstoff mit höherer Radioaktivität mit erfasst.

⁷ Scholz/Hiese, Kapitel 4.1 ff

⁸ Scholz/Hiese, Kapitel 4.1.2

⁹ Scholz/Hiese, Kapitel 4.4 ff

¹⁰ Scholz/Hiese, Kapitel 4.4.1 enthält folgende Anmerkung: »Beim Abbruch von meterdicken mittelalterlichem Mauerwerk hat sich des öfteren gezeigt, dass der Kalkmörtel im Innern der Mauer noch weich (nicht abgebunden) war, weil die Luft nicht bis in diese Mauertiefe vordringen konnte.«

¹¹ Scholz/Hiese, Kapitel 1.3.3.2

¹² Hollemann/Wiberg, Kapitel Silicium: Kondensation der Kieselsäure S. 918 ff

¹³ Diese klaren Verhältnisse ändern sich jedoch entscheidend, wenn ein „hydraulisch“ wirkender Zuschlag verwendet wird. Das kann fein gemahlenes Ziegelmehl sein oder auch (vermutlich) gemahlener Bruch aus der Tonwarenbrennerei. Tonwaren wurden nicht nur aus rötlichem Tonen geformt, sondern der Scherben kommt heute noch in vielen Farbnuancen vor, abhängig von der Fundstelle des Tones. Deshalb schließen braune, graue oder gelbbraune Bestandteile im historischen Mörtel nicht grundsätzlich Ziegelmehl im weitesten Sinne aus. Um diese Überlegung zu überprüfen, die zu den feinen und festen Mörtelbestandteilen der Gotik und der Folgezeit führen würde, müssten entsprechende Mörtel als Modellsubstanzen hergestellt werden.

¹⁴ Hollemann/Wiberg, Kapitel Calcium: Wassermörtel S. 1137 ff

¹⁵ Scholz/Hiese, Kapitel 4.6.2

¹⁶ Auf der italienischen Insel Sizilien werden noch heute zum Bereiten von Baumörtel kleine Kollergänge verwendet. Im Prinzip könnte auf der Baustelle mit Hilfe eines solchen Gerätes zunächst der Tuff ausreichend fein gemahlen werden, dann mit gebranntem Kalk und Wasser zum Mörtel gemischt werden. Der Autor konnte keine „Mühlsteine“ von 50 – 60 cm Durchmesser mit einer Mittelachse unter den Funden aus römischer Zeit in Deutschland ausmachen, die den sizilianischen Vorbildern entsprochen hätten. Das heißt aber nicht, sie wurden nicht von Römern verwendet. Sie wurden möglicherweise bei der nicht umfassenden Suche übersehen.

¹⁷ Eine Überprüfung dieser Vermutung des Verfassers sollte auf jeden Fall vorgenommen werden.

¹⁸ Scholz/Hiese, Kapitel 4.6.4

¹⁹ Als Kontaktperson kann die Laborleiterin von Firma Meurin angesprochen werden: Tel. 02632 70231 Werk Krufft/Eifel

²⁰ Dr. rer. nat. Klaus Unterderweide ist an der Materialprüfungsanstalt 38106 Braunschweig, Beethovenstr.52, beschäftigt und kann unter der Durchwahl 0531 3915419 (oder k.unterderweide@ibmb.tu-bs.de) erreicht werden.

²¹ Scholz/Hiese, Kapitel 4.5.3 Diese Kristalle des rheinischen Trass sind andere als die des Suevit-Trass aus dem Ries bei Nördlingen. Ob die Römer Trass aus dem Ries im süddeutschen Bereich genutzt haben, ist dem Autor nicht bekannt, könnte aber im Rahmen der Untersuchungen geklärt werden. Ebenso könnte recherchiert werden, welches Leitmineral den Tuff aus Pozzuoli charakterisiert. Dann könnte sich eine Antwort auf die Frage nach möglichen Importen aus Italien ergeben.

²² Ladurner/Purtscheller, S. 132

²³ Ladurner/Purtscheller, S. 131

²⁴ Klages, S. 88, Skizze 2 und S. 233 Bilder a) und b)