

Historische Mörtel und Putze. Möglichkeiten und Grenzen der wissenschaftlichen Analytik

Mörtel auf Kalkbasis haben in der Geschichte breite Verwendung zur Verbindung von Mauerwerkselementen und als Putze in der Oberflächengestaltung von Wänden in archäologischen und historischen Komplexen gefunden. Die Fragestellungen an die Konservierungswissenschaft bezüglich Kalkmörtel können drei Hauptproblemfeldern zugeordnet werden:

- Erhaltungszustand und Verwitterungsursachen
- Restaurierung und Konservierung
- Technologie, historischer und sozialer Kontext.

Mangelhafte Kohäsion und Adhäsionsverlust sind die wichtigsten mit Mörtel und Putzen verbundenen Verwitterungsphänomene (Abb. 1). Diese können unter anderem auf deren ursprüngliche Zusammensetzung zurückgeführt werden: Die Art des verwendeten Zuschlags und das Verhältnis von Bindemittel zu Zuschlag (B/Z-Verhältnis), welche die physiko-mechanischen Kenndaten des Mörtels beeinflussen, haben neben der mineralogischen und chemischen Zusammensetzung einen bestimmenden Einfluss auf die Verwitterungsresistenz. Umweltfaktoren und eine eventuell vorhandene Salzbelastung (zuweilen als direkte Folge vorausgegangener Restaurierungsbehandlungen) spielen ebenfalls eine wichtige Rolle im Verwitterungsprozess.

Während restauratorischer Eingriffe, wie Hinterfüllung oder Kittung von Fehlstellen, ist zu beachten, dass die physiko-mechanischen Eigenschaften des Hinterfüll-, Haft- oder Ergänzungsmörtels mit denen des Substrats vergleichbar sind, um einer Inkompatibilität der verwendeten Materialien mit dem Substrat vorzubeugen (Snethlage, 1997). Die Verträglichkeit von Restaurierungsmörteln mit salzbelasteten Substraten stellt eine besondere Herausforderung dar (van Hees, Groot und Pel, 2003). Wissenschaftliche Untersuchungen an unter Normbedingungen hergestellten und ausgehärteten Testmischungen können dazu beitragen, das Risiko folgender Sekundärschäden zu mindern (Böttger, 1997). Ebenfalls ist zu berücksichtigen, dass Adhäsions- bzw. Kohäsionsversagen, auch in Abhängigkeit von ihrem Auftreten innerhalb der Struktur des Putzes, jeweils unterschiedliche Anforderungen an die eingesetzten Konservierungsmittel stellen (Simon, 2001).

Zusätzlich zu wertvollen Informationen für die Konservierung kann das Studium der Mörteltechnologie auch Beiträge zur weiteren Interpretation von Kunst und Kunstwerken der Vergangenheit liefern. In manchen Fällen, insbesondere da, wo solche Untersuchungen in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit Restauratoren erfolgen, können sie die Datierung von Objekten und Gestaltungen erleichtern.

Die Analyse historischer Mörtel beginnt mit einer gut dokumentierten Probenahme (Abb. 2). Der Probenahme folgen parallele Untersuchungen an der Gesamtprobe und an eingebetteten Dünn- bzw. Querschlifften.

Die Gesamtanalyse umfasst die Aufklärung der mineralogisch-chemischen Zusammensetzung sowie eventuell, wenn es die Probenausmaße zulassen, Untersuchungen zu Festigkeit und Porosität. Als chemische Analysemethoden stehen die Röntgendiffraktometrie (XRD) und die Thermoanalyse (TG-DTA) zur

Verfügung (Chiari, Torraca und Santarelli, 1996). Eine wertvolle Ergänzung kann die Infrarotspektroskopie (FT-IR) darstellen (Bläuer-Böhm, Jägers, 1997).

Die mikroskopischen Untersuchungen an Dünnschliffen der Probe liefern ebenfalls Erkenntnisse zur mineralogischen Zusammensetzung, die für die Auswahl des richtigen Verfahrens im Trennungsgang sehr wichtig sind (Mehlmann, 1993). Weitere relevante Elemente sind Form und Größenerfassung des Zuschlags, die Erfassung von Akzessorien und Kalkspatzen, Aussagen zum Gefügebau sowie der Nachweis hydraulischer Bindemittelanteile (Schlütter, Juling und Hilbert, 2001). In Kombination mit weiteren Analyseverfahren, wie der Rasterelektronenmikroskopie, ausgestattet mit einer energie-dispersiven Röntgenanalytik (REM-EDX), sind weitere Aussagen zu den untersuchten Mörteln möglich.

Die Durchführung eines Trennungsgangs erlaubt schließlich weitere genauere Aussagen zu Zuschlag und Bindemittel und unter Umständen auch zu eventuell verwendeten Additiven. In der Praxis erweist sich der Nachweis historisch belegter organischer Zusätze zu Kalkmörteln oft als sehr schwierig.

Im Idealfall besteht zwischen der Situation am Objekt und dem mikroanalytischen Dünnschliff im Labor eine ununterbrochene Dokumentationskette, welche aufgrund ausreichender Überlappung eine genaue Zuordnung des jeweiligen Analysebefunds zulässt. In Taf. XVI, 1 wird dies am Beispiel des Putzes im Treppenhaus eines Bades (Nr. 408, Petra) demonstriert.

Die stratigraphische Zuordnung der einzelnen Analysen ist sehr wichtig. In Taf. XVI, 2 wird der Aufbau des Putzes im Treppenhaus in mehreren Schichten deutlich, die sich zudem chemisch unterscheiden. Der auf dem Stein aufgebrachte Ausgleichsputz A ist gipsgebunden, enthält jedoch auch Kalk, Kalkspatzen sowie sandigen Zuschlag. Die darüber liegenden 3-5 Putzschichten (B-D) sind kalkgebunden, enthalten einige wenige Kalkspatzen bis hin zur ebenfalls kalkhaltigen ockeren Malschicht. Die unten wiedergegebenen FT-IR-Spektren der verschiedenen Schichten unterstreichen die Wichtigkeit einer stratigraphischen Zuordnung. Eine Gesamtanalyse hätte in diesem Fall kaum Sinn.

Dolomitische Kalke enthalten im Bindemittel Calcit sowie Brucit ($Mg(OH)_2$) und die basischen Magnesiumcarbonate Artinit ($MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$) sowie Hydromagnesit $3MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 3H_2O$. Die basischen Carbonate und auch Brucit lassen sich röntgendiffraktometrisch nur bei ausreichender Kristallinität nachweisen (Bläuer-Böhm, Jägers, 1997). In Abb. 3 sind ein römischer Estrich aus der Thermenanlage in Trier und das Infrarotspektrum der Gesamtprobe wiedergegeben. Die Infrarotspektroskopie kann zwar sogar Spuren einer Nitratbelastung nachweisen, eventuelle Gehalte an Periklas (MgO) würden von der Molekülspektroskopie jedoch nicht erfasst. Die FT-IR Spektroskopie ist daher eine sinnvolle Ergänzung zu den herkömmlichen Methoden XRD und TG-DTA in der Mörtelanalytik.

Abb. 1: Nördliches Haus, el-Habis, Petra, Reste farbiger Stuckdekoratation



Abb. 2: Analyse historischer Mörtel

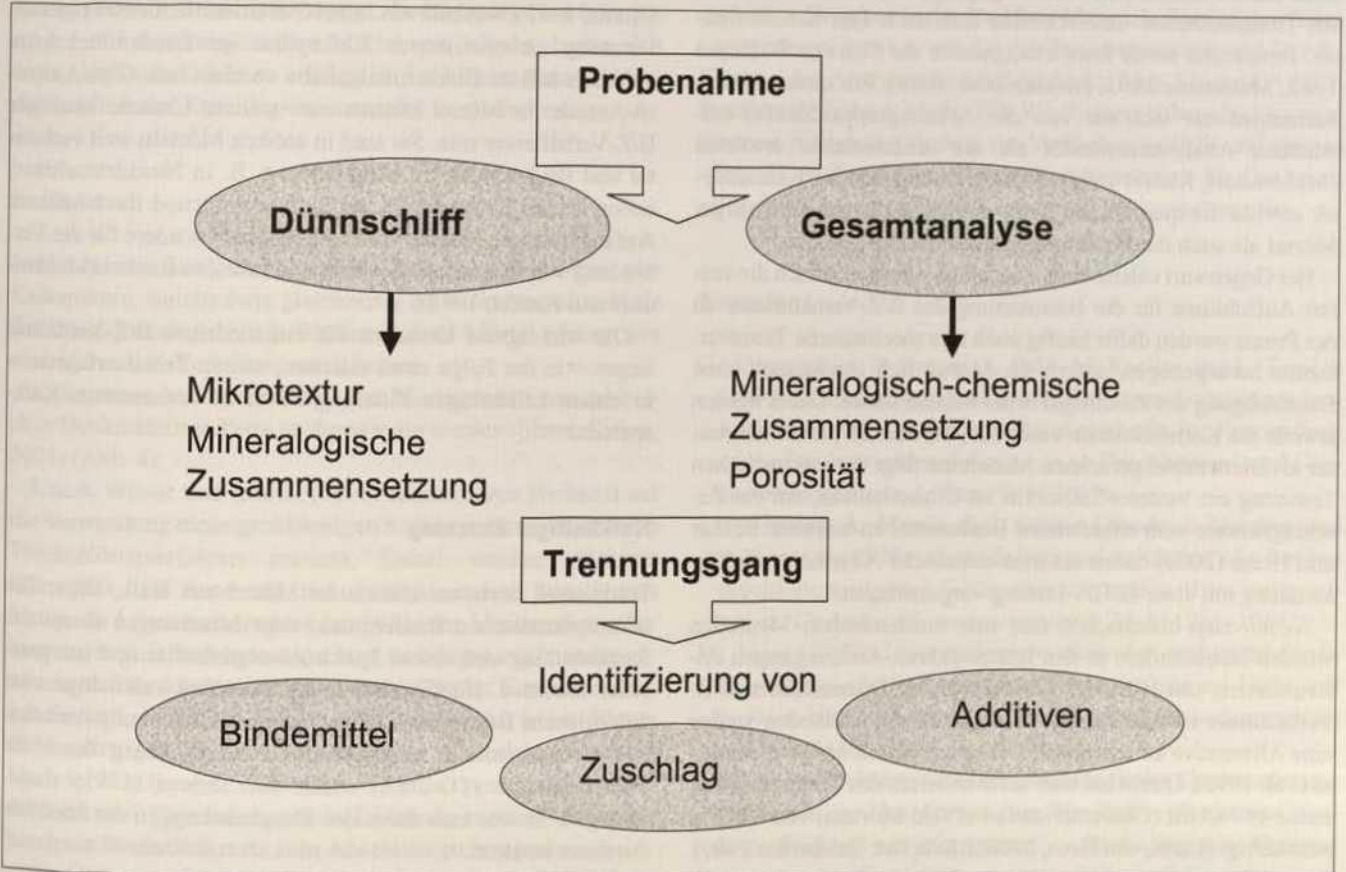
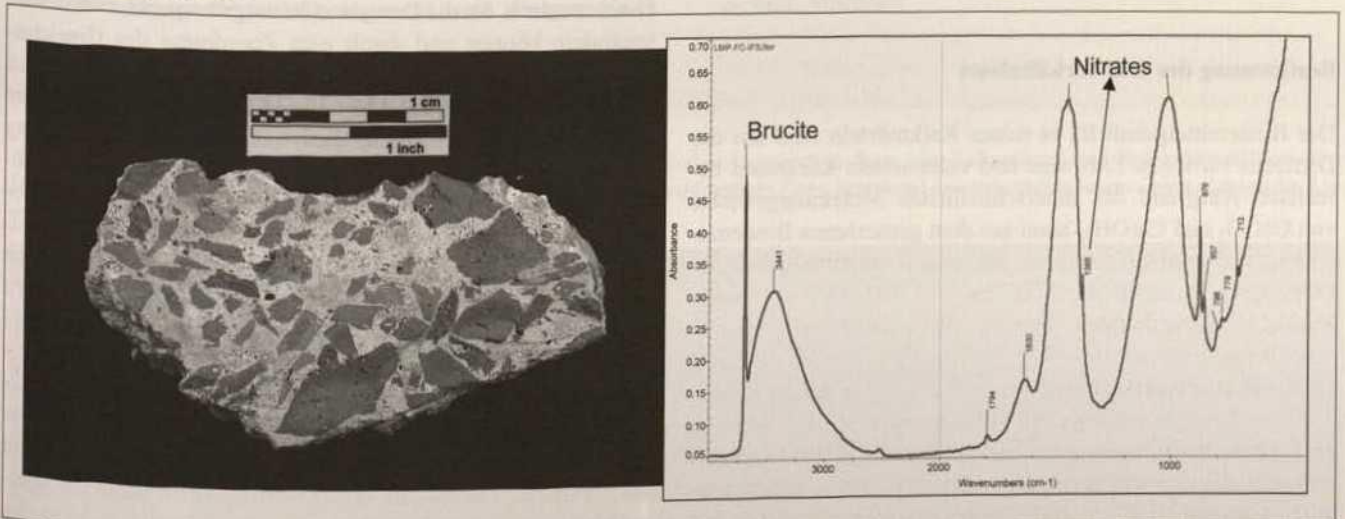


Abb. 3: Römischer Estrich, Thermen Trier, Dolomitischer Kalk mit hohen hydraulischen Anteilen; rechts FT-IR Spektrum zeigt Calcit, Quarz, Silikate, Brucit (Mg(OH)₂)



Das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis

Die Quantifizierung des Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisses (B/Z-Verhältnis) ist ein entscheidendes Element im analytischen Trennungsgang von historischen Mörtelproben. Dieses Verhältnis beeinflusst Schwindverhalten, Porosität und Mikrostruktur des Mörtels und damit Parameter, die die physiko-mechanischen Eigenschaften des Mörtels selbst, wie Wasserspeicher- und Transportverhalten, Festigkeit und Dauerhaftigkeit bestimmen. In der technischen Literatur finden sich zahlreiche, teilweise verschiedene Verfahren zur Bestimmung des B/Z-Verhältnisses.

Die Auflösung des Bindemittels in Säuren ist seit Jędrzejewska (1960) eine der am weitesten verbreiteten Methoden. Es gibt noch keinen normierten Trennungsgang, und die veröffentlichten Trennmethode unterscheiden sich nach Typ, Konzentration, Temperatur sowie Einwirkungsdauer der Säure (z. B. Dupas 1982, Mehlmann 1993, Alvarez et al. 1999). Für unsere Untersuchungen hat sich die von der Arbeitsgruppe Knöfel entwickelte Analysenmethodik als die umfassendste erwiesen (Middendorf, Knöfel 1998). Diese erlaubt neben der Kalkanalytik sowohl die quantitative Analyse gips- bzw. anhydrithaltiger Mörtel als auch die Bestimmung löslicher Silikate.

Bei Gegenwart calcitischen Zuschlags versagen jedoch die sauren Aufschlüsse für die Bestimmung des B/Z-Verhältnisses. In der Praxis werden dafür häufig auch rein mechanische Trennverfahren herangezogen, sofern die Mörtel sich mechanisch ohne Beschädigung der Zuschlagskörner trennen lassen. Dabei werden jeweils die Kornfraktionen unter 150, 60 oder 35 µm Durchmesser als Bindemittel gerechnet. Manchmal folgt der mechanischen Trennung ein weiterer Teilschritt im Ultraschallbad, um die Zuschlagskörner vom anhaftenden Bindemittel zu befreien. Becker und Herm (2000) haben als nass-chemische Alternative die Behandlung mit einer EDTA-Lösung vorgeschlagen.

Neben nass-chemischen und rein mechanischen Methoden wurden insbesondere in den letzten Jahren Anstrengungen unternommen, mit Hilfe der Mikroskopie an Dünnschliffen B/Z-Verhältnisse zu bestimmen. Petrographische Methoden stellen eine Alternative zu chemischen Trennverfahren dar (Alessandri et al. 1992). Damit hat sich unter anderem das Technische Komitee 167 COM (Characterization of Old Mortars) von RILEM beschäftigt (Larbi, van Hees, 2000; Lindqvist, Sandström 2000). Fortschritte im Bereich der digitalen Bildverarbeitung haben die zeitraubende Auswertung nach dem Punktzählverfahren inzwischen beträchtlich abgekürzt.

Bestimmung des B/Z-Verhältnisses

Der Bindemittelgehalt B_G in reinen Kalkmörteln wird aus der Differenz zwischen Einwaage und unlöslichem Rückstand berechnet. Aufgrund des unterschiedlichen Molekulargewichts von CaCO_3 und Ca(OH)_2 kann aus dem gemessenen Bindemittelgehalt B_G (M%) der ursprüngliche Bindemittelgehalt B_U (M%) nach folgender, von Wisser und Knöfel (1987) gegebenen Formel berechnet werden:

$$B_U = 74 \cdot B_G / (100 - 0,26 B_G)$$

Das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis (B/Z-Verhältnis) kann sowohl für den ursprünglichen (B_U) als auch für den gemessenen Bindemittelgehalt (B_G) nach folgender Formel ermittelt werden:

$$B/Z = 1 : (100 - B)/B$$

Dieses B/Z-Verhältnis ist in Masseteilen gegeben und muss noch in baustellenübliche Volumenteile umgerechnet werden. Hierzu müssen die Schüttdichten der verwendeten Rohmaterialien bekannt sein. Diese können nach Gödicke-Dettmering (1997) zu 1,46 g/cm³ für den Zuschlag und ca. 0,5-0,6g/cm³ für Kalkhydrat angenommen werden.

Historische Mörtel und Putze sind vielfach bindemittelreicher als moderne Rezepturen. B/Z-Verhältnisse zwischen 1:0,5 und 1:1,5 in Raumteilen wurden an römischen Mörteln und Putzen (Auras, 1997) sowie auch an nabatäischen Putzen nachgewiesen (Shaer, 2002).

Niedrige B/Z-Verhältnisse sind zum einen darauf zurückzuführen, dass frühere Bindemittel grobkörniger als heute waren (Auras, 1997), weshalb ein höherer Bindemittelbedarf bestand. Vorzeitig carbonatisiertes Kalkhydrat im Bindemittel kann ebenfalls höhere Bindemittelgehalte vortäuschen. Gips/Anhydrit-Anteile im Mörtel können eine weitere Ursache niedriger B/Z-Verhältnisse sein. Sie sind in antiken Mörteln weit verbreitet und fanden auch im Mittelalter, z. B. in Norddeutschland, neben reinen Kalkmörteln vermutlich aufgrund ihrer höheren Anfangsfestigkeit breite Verwendung, insbesondere für die Verbindung von Bögen und Gewölben in sakralen Bauten (Middendorf und Knöfel, 1998).

Die wichtigsten Ursachen für ein niedriges B/Z-Verhältnis liegen – in der Folge eines falschen, sauren Trennverfahrens – in einem kalkhaltigen Zuschlag sowie in vorhandenen Kalkspatzen.

Kalkhaltiger Zuschlag

Traditionell bestehen historische Mörtel aus Kalk, Gips, Ton oder hydraulischen Bindemitteln oder Mischungen dieser mit Sandzuschlag und einem Spektrum organischer und inorganischer Additive. Häufig enthält der Zuschlag kalkhaltige oder dolomitische Bestandteile. Eine analytische Trennung der calcitischen Bestandteile in Bindemittel und Zuschlag durch die Thermoanalyse (TG-DTA) wurde von Deloyé (1991) vorgeschlagen. Er war sich dabei der Einschränkungen der Methode durchaus bewusst.

Chiari, Torraca und Santarelli (1996) diskutieren die Anomalien und Störungen, wie Reaktionen zwischen Calcit und amorphen Silikaten, teilweise katalysiert durch die Gegenwart von Natriumsalzen, die die Decarboxylierungstemperatur von Calcit verändern können und damit eine Zuordnung des Gewichtsverlusts zu Bindemittel- oder Zuschlagsfraktion unmöglich machen. Im Rahmen des Mörtel- und Putzprojekts wurden am Getty Conservation Institute Untersuchungen zur Bestimmung des B/Z-Verhältnisses an Mörteln mit carbonatischen Zuschlagsbestandteilen durchgeführt. Aus Sumpfkalk und gebrochenem Travertin mit bekannter Sieblinie wurden Mörtelprüfkörper erstellt, welche nach erfolgter Carbonatisierung einer B/Z-Bestimmung nach verschiedenen Verfahren unterworfen wurden. In Tabelle 1 sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

In der nass-chemischen Trennung von Bindemittel und Zuschlag liefern sowohl Salzsäure als auch Salicylsäure unbefriedigende Ergebnisse. Erstere löst große Teile des Zuschlags mit auf, während die zweite den Zuschlagsanteil deutlich überschätzt, eventuell aufgrund des Ausfällung einer nicht weiter

untersuchten Verbindung (z. B. Calciumsalicylat?). EDTA-Behandlungen jedoch, falls gut abgestimmt und unter kontrollierten Bedingungen (insbesondere in 0.1 bzw. 0.5 molarer Konzentration), können helfen, das B/Z-Verhältnis von Kalkmörteln mit calcitischem Zuschlag abzuschätzen. Dabei erweist sich das Tetra-Natriumsalz als weniger zeitempfindlich und ist dem Dinatriumsalz vorzuziehen. Bevor die Anwendung jedoch generell empfohlen werden kann, müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um die beste Konzentration und Einwirkungsdauer zu ermitteln.

Die einfache Methode der mechanischen Trennung ist zwar sehr zeitintensiv, aber vor allem in Kombination mit einer nachfolgenden Reinigung des Zuschlags von anhaftendem Bindemittel im Ultraschallbad eine preiswerte Alternative zur Ermittlung von B/Z-Verhältnissen. Die Grenzwerte bei 150 µm ist richtig gewählt. Historische Mörtel, die härter als die relativ frischen, im Labor hergestellten Mörtel sein können, lassen sich unter Umständen nicht so erfolgreich im Mörser trennen, ohne die Sieblinie des Zuschlags nennenswert zu verändern.

Kalkspatzen

Neben calcitischen Zuschlagstoffen kann die Anwesenheit von Kalkspatzen, welche zwar gleichzeitig als Kalkreservoir und als Zuschlag, jedoch nicht als Bindemittel im Mörtel wirken, ein niedrigeres B/Z-Verhältnis vortäuschen.

Kalkspatzen konnten in Putz- und Mörtelproben von zahlreichen Denkmälern in Petra nachgewiesen werden (Shaer, Simon, 2004) (Abb. 4).

Kraus, Wissner und Knöfel (1998) führen deren Herkunft auf die Verwendung eines grobkörnigen Kalkes zurück, wie er beim Trockenlöschverfahren entsteht. Dabei werden stückiger Branntkalk und Sand mit der stoechiometrisch berechneten Menge an Löschwasser (plus ca. 10 %, um Verdampfungsverluste auszugleichen) befeuchtet und mehrlagig aufeinander geschichtet. Eine alternative Methode besteht im Eintauchen von mit Branntkalk gefüllten Körben in Wasser, bis keine Blasen mehr aufsteigen, und der nachfolgenden Abdeckung im Sand. Nach der Lösung lässt man den Mörtel im verschlossenen Gefäß noch ca. 7 Tage ruhen, um die Lösung eventuell noch vorhandener Branntkalkreste zum Abschluss zu bringen.

Als Übergangsformen wären Techniken, wie der im 18. Jahrhundert beschriebene Lorient'sche Mörtel anzusprechen, bei dem eine Mischung aus gelöschtem Kalk, Ziegelmehl und Sand eine bestimmte Menge Branntkalk zugesetzt wird (Berger, 1904).

Mit modernem, trocken gelöschtem Kalkhydrat oder auch mit eingesumpftem Kalk ist die Wahrscheinlichkeit, dass Kalkspatzen gebildet werden, aufgrund der Feinheit der Partikel wesentlich geringer. Auch dadurch ergeben sich niedrigere B/Z-Verhältnisse.

Mörtel mit höherem Bindemittelgehalt (B/Z 1:0,5 bis 2,0), wie sie in römischen oder nabatäischen Putzen häufig nachgewiesen werden, wurden nach Kraus, Wissner und Knöfel (1989) vermutlich auf dem Wege eines Trockenlöschverfahrens erzeugt.

Danksagung

Francesca Casadio, Urs Mueller, David Carson, Eric F. Hansen und Alice Ormsbee in der Building Materials Section des Getty Conservation Institute sei für die Zusammenarbeit und Durchführung der Analysen herzlich gedankt. May Shaer (CARCIP, Petra) und Michael Auras (IFS Wiesbaden) haben dankenswerterweise historische Proben zur Verfügung gestellt und ebenso wie Vojislav Tucic vom Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege in München zahlreiche wertvolle Hinweise gegeben.

Literatur

- G. Alessandrini, R. Bugini, L. Folli, M. Realini und L. Toniolo (1992): The compositional ratios of mortars. Comparison between chemical and petrographical methods, in: *Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*, Lisbon, S. 667–676.
- J. J. Alvarez, A. Martin, P. J. Garcia Casado, I. Navarro und A. Zornoza (1999): Methodology and validation of a hot hydrochloric acid attack for the characterization of ancient mortars, in: *Cement and concrete research* 29, S. 1061–1065.
- M. Auras (1997): *Untersuchungen römischer und mittelalterlicher Mörtel und Putze aus der Thermenanlage am Viehmarkt in Trier*, Interner Bericht, IFS Institut für Steinkonservierung e.V. Wiesbaden.
- T. Becker, Ch. Herm (2000): Technologische Untersuchungsmethoden, in: *Vom Karton zum Wandbild – Ferdinand Hodlers „Rückzug von Marignano“*, – *Technologische Untersuchungen zum Entstehungsprozess*, *Zeitschrift für Schweizerische Archäologie und Kunstgeschichte* 57(3), S. 193–196.
- E. Berger (1904): *Beiträge zur Entwicklungsgeschichte der Maltechnik*, München.

Abb. 4: Fugenmörtel von der Südwand des Cryptoporticus des „Großen Tempels“ in Petra mit Kalkspatzen und Holzkohlepartikeln. Der Dünnschliff (gekreuzte Polarisatoren) links zeigt einen Kalkspatz als zuschlagsfreie Zone, bestehend aus mikrokristallinem Calcit. Zahlreiche Risse sind durch sekundäre Gipskristallisation verfüllt



Trennverfahren	Bedingungen	B/Z (MT)	Bemerkung
HCl Säureaufschluss	> HCl 1: 5 10' > HCl 1:10 30'	Auflösung 1: 0.5	Viel zu aggressiv
Salicylsäure	> 30 g. Salicylsäure, 500 ml MeOH > 15 g salicylic, 500 ml MeOH	1:20 1:22	Weißer Ausfällung auf den Zuschlags- körnern, deutliche Unterschätzung des Bindemittelgehalts
EDTA tetraNa-Salz	> EDTA 0.2 M; 15' > EDTA 0.2 M; 5' > EDTA 0.1 M; 15' > EDTA 0.01 M; 30' > EDTA 0.05 M; 15' > EDTA 0.05 M; 25'	1:4 1:7 1:6 1:27 1:11 1:7	Geeignet v.a. in 0.05 und 0.1 molarer Konzentration
EDTA diNa-Salz	> EDTA 0.1 M; 15' > EDTA 0.05 M; 10'	1:3 1:7	Niedrigerer pH-Wert bewirkt größere Zeitabhängigkeit
Manuelle Trennung	> Binder < 75 µm > Binder < 150 µm	1:30 (1:12)	Bessere Reinigung des Zuschlags von anhaftendem Bindemittel notwendig
Manuelle Trennung mit nachfolgender Reinigung im Ultraschallbad	in deion. Wasser > Bindemittel < 75 µm > Bindemittel < 150 µm in deion. Wasser nach Sieben (< 150 µm) > Bindemittel < 75 µm > Bindemittel < 150 µm	1:13/1:10 1:8/1:6 1:10 1:5	Ultraschallreinigung verbessert deutlich die Genauigkeit, jedoch eingeschränkte Reproduzierbarkeit

Tabelle 1: Ermittlung gravimetrischer B/Z-Verhältnisse mit verschiedenen Laborverfahren (zum Vergleich: ursprüngliches gravimetrisches B/Z-Verhältnis des aus Sumpfkalk und gebrochenem Travertin hergestellten Mörtels: 1:8)

- C. Bläuer-Böhm, E. Jägers (1997): Analysis and Recognition of Dolomitic Lime Mortars, in: *Proceedings of the International Workshop Roman Wall Painting Materials: Techniques, Analysis and Conservation* (ed. by H. Bearat, et. al.), Fribourg, S. 223–235.
- K. G. Böttger (1997): *Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze. Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze*. Weimar.
- G. Chiari, G. Torraca, M. L. Santarelli (1996): Recommendations for Systematic Instrumental Analysis of Ancient Mortars, in: *The Italian Experience. Standards for preservation and rehabilitation*, Stephen J. Kelley (Hrsg.), S. 275–84.
- F. Deloyé (1991): Le calcul minéralogique: application aux monuments anciens, in: *Bulletin de liaison des laboratoires des ponts et chaussées* 175 (1991), S. 59–65.
- M. Dupas (1982): L'Analyse des Mortiers et Enduits des Peintures Murales et des Bâtiments Anciens, in: *Proceeding of the symposium on mortars, cements and grouts used in the conservation of historic buildings*, Rome, S. 281–295.
- T. Gödicke-Dettmering (1997): *Mineralogische und technologische Eigenschaften von hydraulischem Kalk als Bindemittel von Restaurierungsmörteln für Baudenkmäler aus Naturstein*. Diss. Universität Gießen, Bericht 6/1997, Institut für Steinkonservierung, Wiesbaden.
- H. Jedrzejewska (1960): Old mortars in Poland: a new method of investigation, in: *Studies in Conservation* 5, S. 132–138.
- K. Kraus, S. Wisser, D. Knöfel (1998): Über das Löschen von Kalk vor der Mitte des 18. Jahrhunderts. – Literaturswertung und Laborversuche, in: *Arbeitsblätter für Restauratoren*, Heft 1, Gruppe 6 Stein, S. 206–221.
- J. A. Larbi, R. P. J. van Hees (2000): Quantitative microscopical procedure for characterising mortars in historical buildings, in: *Proceedings 14. Internationale Baustofftagung – Ibausil*, September 2000, Weimar, S. 1.1051–1.1060.
- J. E. Lindqvist, M. Sandström (2000): RILEM TC 167-COM: CHARACTERIZATION OF OLD MORTARS, „Quantitative analysis of historical mortars using optical microscopy“, in: *Materials and structures* 33, S. 612–617.
- M. Mehlmann (1993): Bestimmung von chemisch-mineralogischen Kennwerten sowie Untersuchungsmethoden, in: *Mörtel und Steingängungsstoffe in der Denkmalpflege*, D. Knöfel und P. Schubert (Hrsg.), Berlin, S. 39–53.
- B. Middendorf, D. Knöfel (1998): Characterization of historic mortars from buildings in Germany and the Netherlands, in: *Conservation of Historic Brick Structures*, N. Baer (ed.) NATO-CCMS, S. 179–196.
- F. Schlütter, H. Juling, G. Hilbert (2001): Mikroskopische Untersuchungsmethoden in der Analytik historischer Putze und Mörtel, in: *Historische Fassadenputze – Erhaltung und Rekonstruktion*, Andreas Boué (Hrg.), Stuttgart, S. 45–68.
- M. Shaer (2002): persönliche Mitteilung.
- M. Shaer, S. Simon (2004): The Plasters, Renders and Mortars of the Petra Great Temple, in: *6th International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin*, Lisbon, submitted Sept. 2003.
- S. Simon (2001): Die Evaluierung von Produkten und Verfahren zur Wandmalereikonservierung, in: *Konservierung von Wandmalerei* (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege 104), S. 48–60.
- R. Sneathlage (1997): *Leitfaden für Planung und Ausführung naturwissenschaftlicher Untersuchungen zur Steinkonservierung*, Stuttgart.
- R. P. J. van Hees, C. J. W. P. Groot, L. Pel (2003): Compatibility of Plasters and Renders with Salt-loaded Substrates in Historic Buildings, in: *Proceedings of the 5th EC Conference on Cultural Heritage Research*, May 16–18, 2002, R. Kozłowski (Hrsg.), Krakau, Luxemburg, S. 34–38.
- S. Wisser, D. Knöfel (1987): *Untersuchungen an historischen Putz- und Mauermörteln*, Teil 1: *Analysengang, Bautenschutz und Bausanierung* 10, S. 124–126.