

# „DAS MARKTTOR VON MILET: SCHADENSANALYSE UND MODELLEHAFTE SANIERUNGSKONZEPTE“



## **Abschlußbericht**

vorgelegt von  
Prof. Dr. Siegfried Siegesmund und Dr. Jörg Rüdric



# **Abschlußbericht**

## **1 Projekttitle**

„Das Markttor von Milet: Schadensanalyse und Modellhafte Sanierungskonzepte“ AZ 18686-45

## **2 Berichtszeitraum**

Januar 2002 – Mai 2004

## **3 Einleitung**

Das Ziel des Forschungsprojektes war die modellhafte Schadensanalyse des umweltgeschädigten Markttores von Milet. Der Modellcharakter erklärt sich aus der Tatsache, dass Objekte aus Naturstein mit diesen Dimensionen im musealen Innenraumbereich bisher in diesem Kontext noch nicht untersucht worden sind. Bei der Zusammenstellung des interdisziplinären Forschungsteams wurde neben fachlicher Kompetenz besonderes Augenmerk darauf gelegt, sowohl universitäre Arbeitsgruppen als auch frei marktwirtschaftlich agierende Firmen zusammenzubringen. Die im Rahmen des Projektes „Das Markttor von Milet: Schadensanalyse und Modellhafte Sanierungskonzepte“ durchgeführten Arbeiten sind im Folgenden in mehrere Schwerpunktthemen untergliedert und dargestellt.

Die gewonnenen Ergebnisse aus dem Projekt wurden direkt der nunmehr mit der Restaurierung betrauten ARGE Pfanner (Berlin, München) zur Verfügung gestellt. Eine allgemeine populärwissenschaftliche Darstellung des Projektes wurde dem Fachpublikum in einer Veröffentlichung des Magazins „Naturstein“ vorgestellt (s. Anlage 1).

## **4 Bestandserfassung und Schadensverteilung am Gebäude**

Eine grundlegende Erfassung des Bestands der verschiedenen am Markttor von Milet verwendeten Baumaterialien und ihre Zuordnung zu den verschiedenen Aufbau- und Sanierungsphasen wurde durch die ARGE Speiser & Endemann erarbeitet und in einem Bestands glossar zusammengefasst (s. Anlage 2).

Die Gesamtheit der auftretenden Schäden an den Bauteilen wurden in Beziehung zu den verschiedenen Aufbau- und Restaurierungsepochen gestellt und in einem Schadens glossar, erstellt durch die ARGE Speiser & Endemann, dargestellt (s. Anlage 3).

Bezüglich der Schadenskartierung wurde in Absprache mit Herrn Kästner von der Stiftung Preußischer Kulturbesitz eine Kartierachse gezielt ausgewählt. Sie repräsentiert zum einen Bereiche in denen die Gesamtheit der verwendeten Materialien auftreten, zum anderen kommen in der Kartierachse alle auftretenden Schadensformen vor. Dabei wurde die Musterachse so gewählt, dass sowohl Bereiche mit direkten Kriegsschäden, als auch von

diesen Vorgängen unbelastete Bereiche erfasst wurden. Die Schadenskartierung wurde von der ARGE Speiser & Endemann durchgeführt, in Kartenform dargestellt und in einem Bericht dokumentiert sowie interpretiert (s. Anlage 4).

Ein wesentliche Schadensform, die durch die zuvor erwähnten Arbeiten identifiziert werden konnte, sind Makrorisse in Mörtelfugen sowie Bauteil durchlaufend, welche eine bedeutende Schwächung der Standfestigkeit des Objektes vermuten lassen. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden vom Institut für Bauingenieurwesen der Universität Kassel unter Leitung von Prof. Dr. Michael Schmidt und Herrn Dr. Bernhard Middendorf Untersuchungen zur Verformung am Bauwerk vorgenommen. Die Ergebnisse aus diesen Analysen sind in Anlage 5 dokumentiert.

Die wesentlichen Erkenntnisse aus den oben angeführten Arbeiten wurden zusammenfassend der Fachwelt in einer Publikation im Magazin Restauvo vorgestellt (s. Anlage 6).

## **5 Eigenschaften der verbauten Marmore und ihre Verteilung am Gebäude**

Die noch vorhandenen Originalmarmorbauteile des Markttores von Milet stellen ein unwiederbringliches und damit schützenswertes Kulturgut dar. Jede Sanierungsmaßnahme sollte daher darauf abzielen diese Originalsubstanz weitestgehend zu erhalten. Grundlegend für ein materialangepasstes Sanierungskonzept ist dabei die Kenntnis der Materialeigenschaften der zu erhaltenden Substanz. Aus diesem Grund wurden umfangreiche Untersuchungen an den noch vorhandenen Marmorobjekten durchgeführt. Die Erfassung von mineralogischen, gefügekundlichen und petrophysikalischen Materialparametern erfolgte im Rahmen einer Bachelor Arbeit, durchgeführt am GZG der Universität Göttingen von Elke Rothert (s. Anlage 7).

Auf Grundlage der Erkenntnis, dass ursprünglich verschiedene Marmortypen am Marktort verbaut wurden, sollte eine Kartierungskampagne Aufschluss über die Anzahl der verschiedenen Typen liefern sowie die Verteilung der jeweiligen Marmore am Objekt aufschlüsseln. Letzteres ist insbesondere für die späteren Sanierungsmaßnahmen, z.B. einer materialangepassten Konservierung, von entscheidender Bedeutung. Die Unterteilung von Marmortypen erfolgte auf der Basis makroskopischer Gefügeelemente und wurde von Jörg Rüdric des GZG der Universität Göttingen durchgeführt (s. Anlage 8 vgl. auch Anlage 13).

## **6 Charakterisierung der verwendeten Mörtel und modellhafte Entwicklung von Ersatzmaterialien**

Neben den Marmoren wird das verwendete Baumaterial hauptsächlich von verschiedenartigen Mörteln und Ziegelbaustoffen gebildet. Entsprechende Materialien kamen sowohl in der Aufbauphase in den 20iger Jahren des letzten Jahrhunderts als auch bei Sanierungsarbeiten nach dem zweiten Weltkrieg zum Einsatz. Neben einfachen Ausbesserungs- und Ausgleichsmörteln wurden auch vollständige Bauteile aus Ersatzmassen gegossen. Die Erfassung von mineralogischen und technischen Materialeigenschaften dieser Ersatzmaterialien erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit am GZG der Universität Göttingen durch Kathrin Müller (s. Anlage 9).

Die Verwitterung von Baumaterialien wird zum Großteil von den Umweltbedingungen gesteuert denen sie ausgesetzt sind. Um die Klimadaten im Pergamon Museum zu erfassen wurden Datenlogger sowohl gebäudeintern wie auch -extern installiert und die Werte der Luftfeuchtigkeit und Temperatur über ein Jahr lang aufgenommen. Um die Einflüsse bzw. die Abhängigkeit auf das Raumklima zu überprüfen, wurden die Daten den täglichen Besucherzahlen gegenübergestellt und interpretiert. Die Auswertung des Raumklimas befindet sich in der Diplomarbeit von Kathrin Müller (s. Anlage 9). Auszüge der Ergebnisse wurden ebenfalls einem breitem Publikum im Magazin Restauro vorgestellt (s. Anlage 6).

Hinsichtlich der geplanten Sanierungsarbeiten am Markttor wurden von der Arbeitsgruppe von Dr. B. Middendorf des Instituts für Bauingenieurwesen der Universität Kassel modellhaft Ersatzmörtel entwickelt. Das Ziel war hierbei eine optimale Verträglichkeit zu bereits verwendeten Mörteln und den vorhandenen Marmorvarietäten zu erreichen. Die Ergebnisse sind ausführlich in einer Diplomarbeit von Verena Maack dargestellt (s. Anlage 10). Auszüge der wichtigsten Ergebnisse wurden der Fachwelt in zwei Publikationen präsentiert (s. Anlage 11 und 12). Eine weitere Darstellung soll im Rahmen des DBU-Sonderbandes 2005 zur Tagung Kulturgüterschutz erfolgen. Ein Vorabdruck ist in Anlage 13 zu finden.

Die Verträglichkeit von Marmor, Mörtel und Konservierungsmittel wurde modellhaft in Laborversuchen überprüft. Hierzu wurde ein Schalenaufbau vergleichbar zur Säulensituation am Markttor (außen Originalmarmor, innen Kalkmörtel) gewählt. Die Überprüfung der Verträglichkeit erfolgte durch Belastungssimulation im Klimaschrank an modellhaft konservierten sowie nicht konservierten Proben. Die Veränderung des Probenmaterials wurde zum einen visuell, zum anderen mittels Ultraschalllaufzeiten überprüft. Die Ergebnisse sind ausführlich in der Arbeit von Kathrin Müller dargestellt und diskutiert (s. Anlage 9).

## **7 Zerstörungsfreie Erfassung des Inneren Aufbaus von Bauteilen und quantitative Erfassung von Schäden**

Ein wesentlicher Befund für die Entwicklung nachhaltiger Restaurierungs- bzw. Konsolidierungsstrategien für nicht-tragende und tragende Bauteile ist die zerstörungsfreie Prüfung des Verwitterungszustandes einzelner Bauteile. Hierzu kamen die Ultraschalltomographie, das Georadar und die Tomographie des spezifischen elektrischen Widerstandes zur Ermittlung des Internaufbaues von Trommelsäulen zum Einsatz. Zwar ist der generelle Aufbau der Säulen, mit einem zentralem Stahlgerüst und einer Ausfüllung der Hohlräume mit Beton, Ziegel sowie Kalkmörtel bekannt, die Anordnung und genaue Lage der verschiedenen Materialien innerhalb der jeweiligen Säule ist jedoch weitgehend unklar. Die zerstörungsfreien Untersuchungen wurden von der Universität Göttingen gemeinsam mit der Arbeitsgruppe Yaramanci & Hettrich (TU Berlin) und Jakobs & Just (Universität Leipzig) durchgeführt (s. Anlage 14 bis 17).

Zur Material- und Schadensbestandsaufnahme wurden von Hornschuch & Heckes (Bergbaumuseum Bochum, s. Anlage 18) Multispektral-Analysen an einer ausgewählten Kartierachse durchgeführt. Multispektrale Aufnahmen registrieren die vom Objekt reflektierte Strahlung in verschiedenen voneinander getrennten Spektralbereichen. Schadenstypen wie Mörtelschleier, Roststellen oder auch die Klassifizierung der Marmortypen standen bei diesen Untersuchungen im Vordergrund. Pseudofarbbilder, Quotientenbilder und künstlich erzeugte Bilder mittels Kanaldivision erlaubten eine gute Isolierung einzelner Schadenstypen. Die Verteilung der am Markttor verwendeten Marmortypen stellte sich als eher problematisch dar.

Durch den Ansatz einer wissenschaftlichen Klassifizierung, die hier eine direkte Koordination mit den Restauratoren verlange, konnten jedoch „Trends“ herausgearbeitet werden.

## **8 Mikrobielle Belastung**

Nicht unerheblich ist der möglicherweise anthropogene Belastungspfad, der vor dem Hintergrund von durchschnittlich 6000 Besucher /-innen am Tag (mit Spitzenwerten die um 20000 Personen/Tag) erheblich die Komposition der Innenraumluft beeinflussen dürfte. Um einen Eindruck über die gesamte mikrobielle Belastung der Raumluft im unmittelbaren Umfeld des Markttors zu gewinnen, wurden von Hoppert (Mikrobiologie der Universität Göttingen) Keimzahlen in der Raumluft und auf der Objektoberfläche bestimmt (s. Anlage 19).

## **9 Darstellung des Projekts in Arbeitstreffen und Kolloquien**

Die Darstellung der Forschungsergebnisse und der Austausch von Erkenntnissen erfolgten weiterhin im Rahmen von Arbeitstreffen und Kolloquien. Diese Arbeitstreffen sollten vor allem den Informationsaustausch zwischen den beteiligten Gruppen aus der Forschung, der Stiftung Preußischer Kulturbesitz und dem Bereich der Objektrestaurierung fördern.

### **Arbeitstreffen im Januar 2002 im Pergamon Museum Berlin**

- I.** Terminabsprachen; Start der Arbeitsschritte zur Schadensanalyse am Markttor
- II.** Diskussion der Inhalte und Abfolge der einzelnen Arbeitsschritte zur Schadensanalyse
- III.** Diskussion zur Zielsetzung

Anwesende: Prof. S. Siegesmund (Universität Göttingen), J. Rüdric (Universität Göttingen), Dr. B. Middendorf (Universität Kassel), Dr. V. Kästner (Stiftung Preußischer Kulturbesitz), Prof. M. Schmidt (Universität Kassel), Frau Ott (Universität Kassel), S. Speiser (ARGE), Herr Endemann (ARGE), Herr Nordhoff (Universität Göttingen), T. Eggers (Universität Göttingen) Herr Köpfer (Firma Sontec), Herr Guldin (Firma Sontec)

### **Statusseminar im Herbst 2002 im Pergamon Museum Berlin**

Umfangreiche Darstellung von Ergebnissen der bisher durchgeführten Untersuchungen.

**SIEGFRIED SIEGESMUND** (Universität Göttingen)  
Vorstellung des Projektes Markttor von Milet

**HERR HEILMEYER/VOLKER KÄSTNER** (Stiftung Preußischer Kulturbesitz)  
Das Markttor von Milet: eine Objekterläuterung

**SEBASTIAN SPEISER/HERR ENDEMANN** (ARGE)  
Bestands und Schadensinventar am Markttor von Milet

**SIEGFRIED SIEGESMUND**  
Die am Markttor verwendeten Marmore: petrographische, petrophysikalische und gefügekundliche Eigenschaften

**BERNHARD MIDDENDORF** (Universität Kassel)  
Die Materialeigenschaften der am Markttor von Milet verwendeten Mörtel

**SIEGFRIED SIEGESMUND/ SEBASTIAN SPEISER**

Erste Erkenntnisse über das Innenraumklima des Pergamonmuseums durch Langzeit-Klimamessungen

**BERHARD MIDDENDORF/MICHAEL SCHMIDT** (Universität Kassel)

Verformungsmessungen am Markttor von Milet

**MICHAEL HOPPERT** (Universität Göttingen)

Bioimpakt

**MARIAN HERTRICH/UGUR YARAMANCI** (Technische Universität Berlin)

Der Innere Aufbau von Marmorsäulen des Markttores ermittelt mit dem Georadar

**ANITA JUST** (Universität Leipzig)

Ergebnisse der elektrischen Widerstandstomographie

**SIEGFRIED SIEGESMUND**

Struktureller Aufbau hohlgebohrter Säulen mittels Ultraschalltomographie

Weitere Gäste: Dr. A. Weinmann (DBU), Dr. W. Real (DBU), Dr. E. Stadlbauer (NLfB), Prof. R. Snethlage, (BLfD)

**Tagung Umwelt-Naturstein-Denkmal, Frühjahr 2005, Osnabrück**

Eine umfangreiche Darstellung und Präsentation des Projektes „Das Markttor von Milet: Schadensanalyse und Modellhafte Sanierungskonzepte“ ist im Rahmen der Tagung „Umwelt-Naturstein-Denkmal“ im Frühjahr 2005 in Osnabrück geplant. An diesem Treffen werden voraussichtlich über 200 Personen aus dem Bereich der Denkmalpflege, der Gebäudesanierung und der Forschung zum Kulturgüterschutz teilnehmen. Damit stellt diese Tagung ein geeignetes Forum für die Präsentation der interdisziplinären Ansätze und Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt Markttor von Milet dar.

## Anlagen

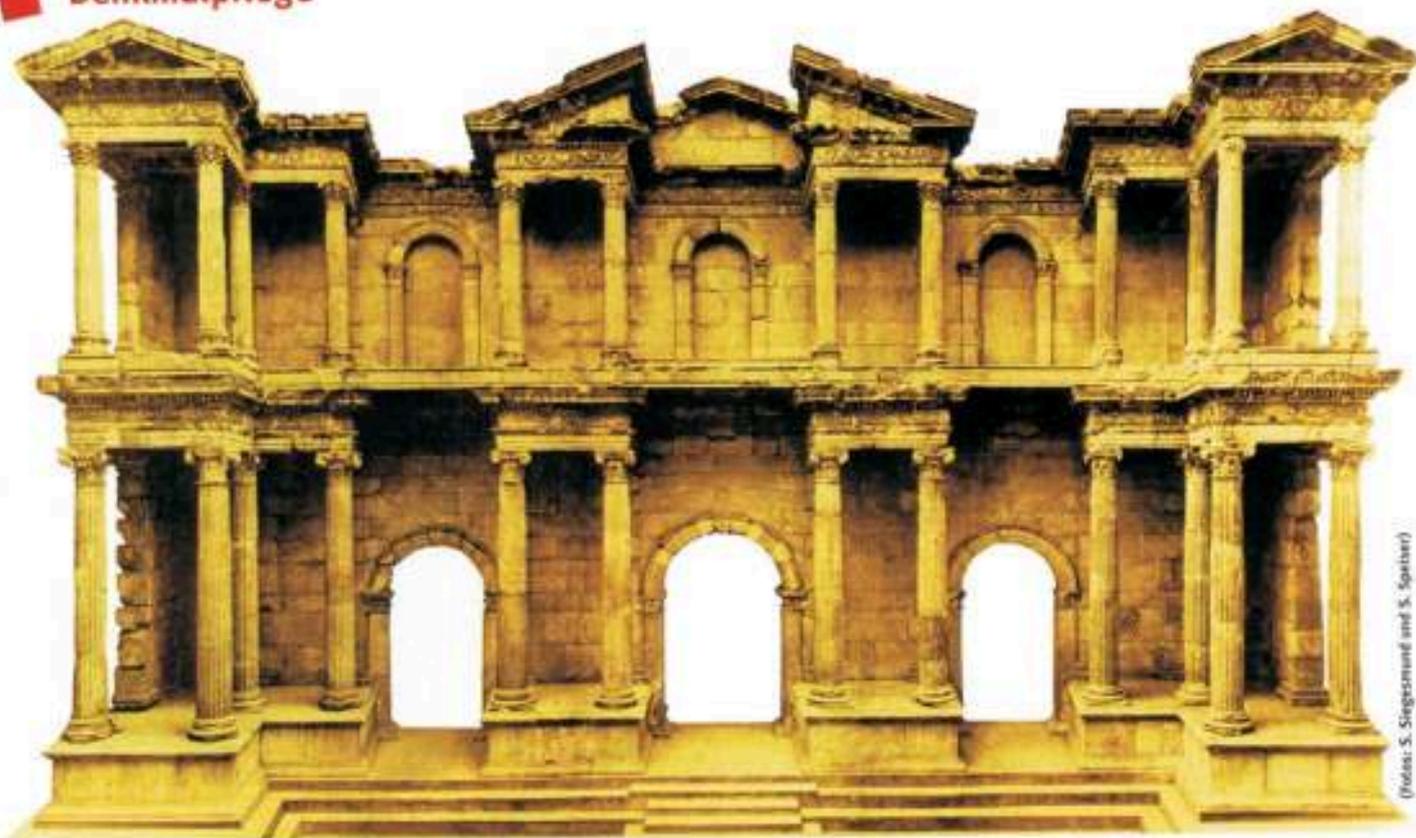
- Anlage 1: Hilfe für das Markttor von Milet. Siegfried Siegesmund & Sebastian Speiser, Naturstein 3/2004
- Anlage 2: Bestands glossar, ARGE Speiser & Endemann
- Anlage 3: Schadens glossar, ARGE Speiser & Endemann
- Anlage 4: Schadens kartierung, ARGE Speiser & Endemann
- Anlage 5: Verformungsmessungen am Markttor von Milet. Prof. Dr. M. Schmidt und Dr. B. Middendorf.
- Anlage 6: Das Markttor von Milet. Siegesmund, S., Rüdlich, J. & Speiser, S, Restauo.
- Anlage 7: Gesteintechnische Eigenschaften ausgebauter Marmore des Markttores von Milet. Bachelorarbeit, Elke Rothert, GZG Universität Göttingen.
- Anlage 8: Untersuchung zur Verwendung verschiedener Marmortypen am Markttor von Milet, Pergamon Museum/Berlin Jörg Rüdlich, GZG Universität Göttingen
- Anlage 9: Mineralogische, gefügekundliche und gesteintechnische Eigenschaften von Geomaterialien des Markttores von Milet. Diplomarbeit, Katrin Müller, GZG Universität Göttingen.
- Anlage 10: Entwicklung kompatibler Vergussmörtel zur Instandsetzung der Säulen des Markttores von Milet im Berliner Pergamon Museum. Diplomarbeit, Verena Maack, Institut für Bauingenieurwesen der Universität Kassel.
- Anlage 11: Development of compatible mortars for the restoration of the Market Gate of Milet, Pergamon Museum Berlin, Germany. Middendorf, B., Maack, V. & Siegesmund S.
- Anlage 12: The Market Gate of Milet of the Pergamon Museum Berlin - Deterioration Characteristics and Mortar Development for Restoration purposes. Middendorf, B., Siegesmund, S., Maack, V., Müller, K. & Ruedrich, J.
- Anlage 13: Das Markttor von Milet: Schadensbilder, Materialcharakteristika und Entwicklung von Restauriermörtel. Siegesmund, S., Middendorf, B., Maack, V. & Rüdlich, J.
- Anlage 14: Radaruntersuchung am Markttor von Milet Pergamon-Museum Berlin. (Sontec GmbH Berlin).
- Anlage 15: Radarmessungen an Marmorsäulen. M. Hertrich, J. Schmalholz, U. Yaramanci
- Anlage 16: Elektrische Widerstandstomographie zur Zustandsbewertung von Bauwerken - Ergebnisse von Messungen im Pergamonmuseum. Just, A., Danckwardt, E., Jacobs, F., Universität Leipzig.
- Anlage 17: Construction physics of the Market Gate of Miletus discovered by non-destructive tools. Ruedrich, J., Hertrich, M., Just, A., Siegesmund, S., Yaramanci U. & Jacobs, F.
- Anlage 18: Fotografische Dokumentation und Multispektral-Analysen am Markttor von Milet im Pergamon Museum, Berlin. A. Hornschuch & J. Heckes.
- Anlage 19: Markttor von Milet: Schadwirkung durch Biofilme. (Michael Hoppert unter Mitarbeit von Oliver Schieweck, Institut für Mikrobiologie und Genetik der Universität Göttingen).

# Anlage 1

Hilfe für das Markttor von Milet.

Siegfried Siegesmund & Sebastian Speiser  
Naturstein 3/2004





(Fotos: S. Siegesmund und S. Speiser)

Abb. 1: Das Markttor von Milet.

Schadensanalyse und Sanierungskonzepte:

# Hilfe für das Markttor von Milet

**Siegfried Siegesmund und Sebastian Speiser** ■ Das Markttor von Milet, eines der wichtigsten Exponate des Berliner Pergamonmuseums, hat durch Beschädigung im 2. Weltkrieg, falsche Sanierung und Millionen von Museumsbesuchern stark gelitten. Die Analyse der Bausubstanz und geeignete Restaurierungsmaßnahmen sollen sicher stellen, dass es weiter besteht.

Die Stadtverwaltung von Berlin will trotz angespannter Finanzlage die berühmte Museumsinsel komplett wieder aufbauen. Die geplanten Maßnahmen, die zwischen 2010 und 2015 durchgeführt werden sollen, sehen eine vollständige Rekonstruktion der Bauwerke und Exponate vor. Zu den zu sanierenden Exponaten zählt das Markttor von Milet im Pergamonmuseum. Bedingt durch Zerstörungen, gewaltsame Eingriffe und fehlerhafte Ergänzungen ist es sehr zerbrechlich und in seinem Bestand gefährdet. Im Rahmen eines von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projektes werden modell-

hafte Konzeptionen für Sanierungsarbeiten entwickelt.

## Zur Restaurierungsgeschichte

Das Markttor von Milet (Abb. 1) steht als einzigartiges archäologisches Baudenkmal in der Weltkulturerbeliste der UNESCO. Es gehört zur Antikensammlung im Pergamonmuseum, das seine Entstehung den bedeutenden Ausgrabungen der Berliner Museen in Kleinasien, v.a. im namensgebenden Pergamon (Pergamonaltar), aber auch in Magnesia, Priene und Milet (Markttor von Milet) verdankt. Die Architekturfragmente und Trümmer der zweistöckigen Markttorfassade wur-

den 1903 bei deutschen Grabungen in der Stadt Milet unter Leitung des Archäologen T. Wiegand geborgen und in den Jahren 1907 und 1908 nach Berlin überführt. Von 1925 bis 1929 wurde das aus 750 t Marmorfragmenten bestehende Tor nach Angaben von Architekt Hubert Knackfuß unter Leitung des Archäologen Wilhelm von Massow im neuen, nach dem 1. Weltkrieg eigens erweiterten Pergamonmuseum rekonstruiert und wieder aufgebaut.



Abb. 2: Kriegsschäden am rechten Flügel des Markttors von Milet.

## Nach dem 1. Weltkrieg: Aufbau im Pergamonmuseum

Im Zuge dieser Aufbaumaßnahmen bohrte man aus statischen Gründen alle Säulenschäfte bis auf eine Außenhaut mit einer Stärke von ca. 3 bis 6 mm aus und versah sie im Inneren mit durchlaufenden Stahlstützen; teilweise goss man sie sogar mit Beton aus. Ferner montierte man alle Teile auf einem Eisengerüst und durchbohrte Säulen, Kapitelle sowie Gebälke. Da diese Aufbaumaßnahmen nicht genau dokumentiert wurden (zumindest ist nichts überliefert), kann man zum Umfang und zur Art der Eingriffe an den Marmorfragmenten nur Mutmaßungen anstellen.

## Restaurierung nach dem 2. Weltkrieg

Die bei der Anastylose in den 1920er-Jahren angewendete Technologie ist ungewöhnlich und aus heutiger Sicht problematisch. Infolge der neben den Originalteilen aus Marmor eingebrachten Gipsergänzungen, Betonfüllungen, Ziegelwänden und Eisenprofil-Gerüsten sowie der Ausbesserungen nach Beschädigung im 2. Weltkrieg ergibt sich ein sehr komplexes Gefüge.

Während des 2. Weltkriegs wurde das Tor trotz Schutzmauerung durch einen Luftminentreffer schwer beschädigt (Abb. 2). Die Bombenexplosion zerstörte das Dach und das Oberlicht über dem Markttor, ließ fast den ganzen rechten Torflügel einstürzen und verursachte Brandschäden. Außerdem bewirkten umherfliegende Schrapnellensplitter weitere Abplatzungen und Einschlagkrater am gesamten Baukörper. Ein Winter verging, bis man das Tor durch ein Notdach vor der freien Bewitterung schützen konnte. Umfangreiche Restaurierungsmaßnahmen, die 1952 bis 1954 unter archäologischer Leitung von H. H. Völker durchgeführt wurden, versetzten das Bauwerk in den heutigen Zustand.

## Zum aktuellen baulichen Zustand

Aktuell lassen sich vielfältige, z. T. starke Schadensbilder bereits mit dem bloßen Auge erkennen, z. B. die für Marmor typischen Schadenskonstellationen wie Risse bis Risszonen, Abplatzungen oder Vergrauungen. Besonders starke Schäden sind v. a. im vom Bombenkrieg 1945 zerstörten, rechten Giebelbereich zu beobachten sowie an der oberen Säulenordnung auf der gesamten Breite des Tores. Im Abschnitt der Untergeschoss-Gesimse zeigen sich starke Ausblühungen. Gerade in den letzten Jahren musste das Museumspersonal immer wieder abgebrochene Teile bergen, an denen sich die fortschreitende dramatische Schädigung

des Objektes ablesen lässt. Aus Sicherheitsgründen wurde ein Steinschlagnetz angebracht.

Die Denkmalpfleger führen den bedenklichen baulichen Zustand und den fortschreitenden Verfall des Bauwerks z. T. auf die ständig einwirkenden Atmosphärien der Innenraumluft des Museums zurück, aber auch auf Unverträglichkeiten der am Tor verwendeten (Alt-)Ergänzungen, Eisenarmierungen und des Original-Marmors im Wechselspiel mit schädigenden Umwelteinflüssen.

## Schadensanalyse

Bedingt durch die Schadensbilder wird nun im Vorfeld der geplanten und zwingend notwendigen Generalsanierung des Objekts eine grundlegende Schadensdiagnose mit begleitenden naturwissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt. Dieses Projekt finanziert die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. Eine interdisziplinäre Arbeitsgemeinschaft aus Geologen, Restauratoren, Baustoffkundlern und Vermessungsingenieuren wird unter Leitung von Prof. S. Siegesmund, Universität Göttingen ([www.geomasek.de](http://www.geomasek.de)), Konzepte für eine nachhaltige Sanierung des Tores erarbeiten und einen bedarfs- und objektorientierten Maßnahmenkatalog erstellen.

Zuerst wird die modellhafte Schadensanalyse durchgeführt werden. Diese Projektphase beinhaltet die Auswertung vorhandener Untersuchungsberichte und Unterlagen über bereits durchgeführte Sanierungen (Prof. Heilmeyer und Dr. Kästner, Antikensammlung Berlin).

## Schadenskartierung

Die eigentliche Schadenskartierung wird die Restauratorengruppe Speiser ausführen. Grundlage ihrer Arbeit ist die photogrammetrische Aufnahme des Objekts, die ein verformungsgerechtes Aufmaß voraussetzt (Bergbaumuseum Bochum). Das Ziel der Schadenskartierung ist die exemplarische Erfassung aller am Markttor auftretenden Schadensphänomene. Die durch den Bombentreffer während des 2. Weltkriegs zerstörten Bereiche sind dabei von besonderem Interesse. Zu den Schäden in diesen Bereichen zählen Risse, Fehlstellen, Ermüdungsbrüche, Abplatzungen, Materialverluste, Salzausblühungen, Rostschäden, Oberflächenaufrauung, (Schmutz-) Krusten und mikrobiologischer Befall (Abb. 3). Besondere Bedeutung kommt der Erfassung der Raumklimadaten zu: Viele der beobachteten Schäden sind zumindest mittelbar an Klima-Variationen (Temperatur, relative Feuchte, Taupunktunterschreitungen etc.) gekoppelt. Man muss daher

# Thumm

TREPPENSYSTEME UND MEHR



Verlassen Sie sich auf unsere **freitragenden Treppen**

Alle sicherheitsrelevanten Bauteile werden bei uns geprüft und besitzen die notwendigen bauaufsichtlichen Zulassungen. Unser umfangreiches Zubehörprogramm sichert Ihnen **Flexibilität**.

Um schnell auf die **Wünsche Ihrer Kunden** reagieren zu können, halten wir ein großes Auslieferungslager für Sie bereit. So sind die meisten Produkte bereits am nächsten Tag bei Ihnen.

Profitieren Sie von unserer über **45-jährigen Erfahrung im Treppenaufbau**.

In der Au 14  
72622 Nürtingen  
Telefon (07022) 9276-0  
Telefax (07022) 9276-50  
[www.thumm-treppen.de](http://www.thumm-treppen.de)

## Thumm & Co.

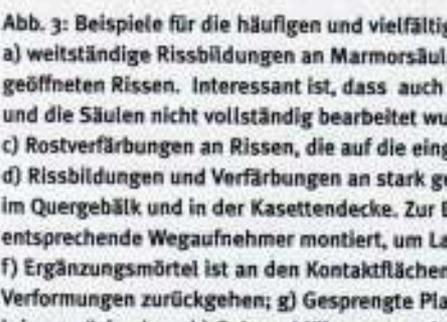
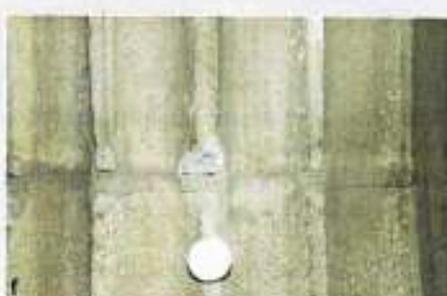
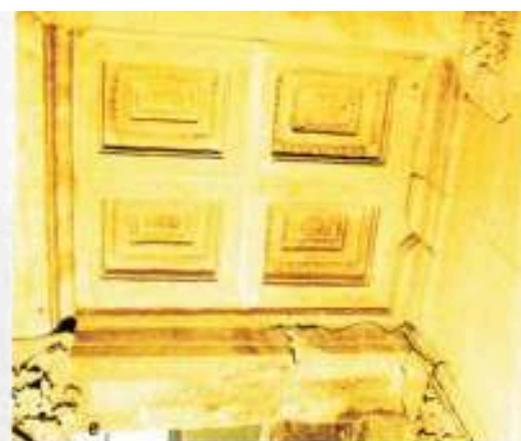


Abb. 3: Beispiele für die häufigen und vielfältigen Schadensbilder:

- a) weitständige Rissbildungen an Marmorsäulen. Sinterkrusten finden sich sehr häufig direkt an geöffneten Rissen. Interessant ist, dass auch die antiken Steinmetzen unter Zeitdruck standen und die Säulen nicht vollständig bearbeitet wurden;
- b) Salzausblühungen auf Putzoberflächen;
- c) Rostverfärbungen an Rissen, die auf die eingelegten Eisenträger zurückgehen sollten;
- d) Rissbildungen und Verfärbungen an stark geschädigten Marmorsäulen;
- e) weitständige Risse im Quergebälk und in der Kasettendecke. Zur Bestimmung eventueller Verformungen wurden entsprechende Wegaufnehmer montiert, um Langzeitbeobachtungen durchzuführen;
- f) Ergänzungsmörtel ist an den Kontaktflächen abgeplatzt und könnte auf spannungsinduzierte Verformungen zurückgehen;
- g) Gesprengte Platten, die vermutlich auf die Schäden im 2. Weltkrieg zurückgehen;
- h) Salzausblühungen und Materialverlust im Sockelbereich.

untersuchen, ob und in wie weit die derzeitigen Innenraum-Umweltbedingungen den Verfall des Objektes begünstigen. Nicht unerheblich ist der möglicherweise anthropogene Belastungspfad, der vor dem Hintergrund von durchschnittlich 6000 (!) Besuchern am Tag (mit Spitzenwerten um die 20000 Personen pro Tag) erheblich die Komposition der Innenraumatmosphäre beeinflussen dürfte. Zu der Wechselwirkung Besucher versus Ausstellungsobjekt gibt es in der einschlägigen Literatur noch keine ausreichenden Veröffentlichungen.

Desweiteren wird das Raumklima durch die defekten Belüftungskanäle in den Museumswänden des Pergamonmuseums beeinträchtigt, die durch Schuttreste aus

dem 2. Weltkrieg verfüllt sind. Zudem hat sich das ehemals weiß getünchte Glasdach mit der Zeit verdunkelt, was zu einer zusätzlichen Aufheizung bei direkter Sonnenbestrahlung führt. Das Temperaturspektrum im Innenraum, direkt am Markttor gemessen, erstreckt sich von 15 °C in Bodenniveau bis 70 °C direkt unter dem Dach. Dieser starke Unterschied zeigt bereits die extremen Klimabelastungen, denen die am Objekt verbauten Materialien ausgesetzt sind (Abb. 4). Aus verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen ist bekannt, dass gerade der Marmor sehr sensibel auf höhere Temperaturen und Feuchtevariationen reagiert (siehe NATURSTEIN 5/2001).

### Untersuchungen zur Verwitterung

Zerstörungsfreie Prüfungen des Verwitterungszustandes der einzelnen Bauteile, die der Ermittlung von Konservierungsstrategien dienen, gehören ebenso zum Arbeitsprogramm wie Ultraschalltomographische Analysen (Abb. 5) der Internstruktur ausgewählter Bauteile mit Armierungen (Säulen). Darüber hinaus ist eine zerstörungsarme Charakterisierung der Tiefenabhängigkeit der Verwitterung durch Ermittlung von Entfestigungs-Tiefenprofilen (Mikro-Bohrhärte) und/oder Georadar sowie Geoelektrik geplant. Diese Arbeiten werden von der Universität Göttingen gemeinsam mit der Arbeitsgruppe von Prof. Yaramanci (TU Berlin) durchgeführt.

In Laboruntersuchungen werden übliche gesteintechnische Basisdaten zum Marmor sowie zum Verwitterungsstatus der entsprechenden Natursteine und Verbundwerkstoffe erhoben. Insbesondere geht es um die Analyse der Materialverträglichkeiten unter der besonderen Umweltsituation »Museum« (Abb. 6). Dafür werden entsprechende Laborarbeiten vorangetrieben. Die Untersuchungen konzentrieren sich u. a. auf Mörtel, die nicht ausfärben und vergleichbare technische Eigenschaften wie der Marmor aufweisen. Desweiteren ist es unbedingt erforderlich, dass sie unter dem Innenraumklima nicht mit dem Marmor reagieren. Dazu laufen bereits im Labor von Dr. Middendorf (Baustoffkunde, Uni Kassel) weiterreichende »Allergietests«, die bezüglich Festigkeiten, Reaktivitäten und thermisch-hygrischen Kenngrößen die Entwicklung eines optimierten »Marmor-Mörtels« zum Ziel haben. Anschließend will man Verwitterungssimulationen durchführen (und zwar unter verschiedenen Klimabedingungen entsprechend der bautechnischen Gegebenheiten (expositionsabhängige Temperatur- und Feuchtebedingungen) in einer Klimakammer.

### Fazit

Die Besonderheit des DBU-Projekts besteht zum einen darin, dass Objekte aus Naturstein mit diesen Dimensionen im musealen Innenraumbereich bisher so noch nicht untersucht worden sind. Die auftretenden Schäden können nicht mit bekannten Techniken saniert werden; deshalb ist die interdisziplinäre Entwicklung und Verknüpfung neuer, problemangepasster Methoden erforderlich. Zum anderen verlangt das einzigartige Konzept, das beim Aufbau des Markttors um 1929 verfolgt wurde, nach sehr spezifischen Untersuchungsstrategien. Beispielsweise sind, wie bereits beschrieben, sämtliche 24 Säulen mit einem Kernbohrer bis auf eine 3 bis 6 mm dicke Außenhaut ausgebohrt und mittels Stahlarmierungen und teilweise zusätzlich mit Beton stabilisiert worden. Da aus dieser Zeit keine Überlieferungen über die verwendeten Materialien und die Art des Einbaus vorliegen, sind die genaue Lokalisierung der verbauten Eisenarmierungen und die Identifizierung des verwendeten Materials unerlässlich. Auf dieser Basis können dann die zu erwartenden Materialunverträglichkeiten, z. B. an den Grenzflächen Eisenarmierung-Originalmarmor oder »Beton«-Originalmarmor untersucht werden.

Es stellt sich die Frage, ob die penetrativ zu beobachtenden Rissbildungen allein auf den Bombentreffer zurückgeführt

Abb. 4: Montage von Verformungsmessungen und Temperaturfühler in Bereichen starker Rissbildung für das Langzeit-Monitoring.

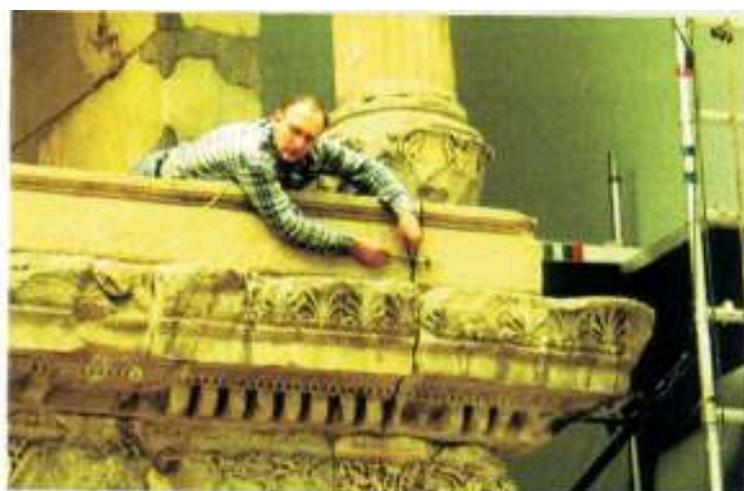


Abb. 5: Ultraschalltomographische Vermessungen der Marmorsäulen zur zerstörungsfreien Analyse des internen Aufbaus.



werden können. Rissöffnungen und ihre Vernetzungen belegen, dass Spannungen vom starren »Stahlkorsett« auf das Bauwerk übertragen werden. Diese Bewegungen scheinen nach ersten Erkenntnissen in der Längsrichtung und auch quer dazu aktiv zu sein. Daher ist es ein wesentliches Ziel, die für die Wissenschaft überaus wertvolle Originalsubstanz an antiken Oberflächen und Werksteinmaterialien zu erhalten.



Abb. 6: Probenahme zur Analyse der Tiefenverteilung von Salzen und Mörteln.

Wie bereits erläutert, muss das Markttor im Zuge des anstehenden Museumsumbaus komplett demontiert werden. Der direkte Abbau im Ist-Zustand ohne festigende Maßnahmen könnte eine massive Zerstörung des Bauwerks nach sich ziehen. Sollten Rosterscheinungen und Salzausblühungen ein penetratives Phänomen sein, ist darüber nachzudenken, eventuell alle Originale vorher zu tränken, da das Entkernen extreme mechanische Beanspruchungen erwarten lässt. Archivunterlagen berichten dazu, dass bereits beim Ausbohren in der Aufbauphase viel Material unwiederbringlich verloren gegangen ist. Eine vorherige Tränkung könnte natürlich zusätzliche Materialunverträglichkeiten erzeugen, da nicht klar ist, inwieweit mikroklimatische Extremsituationen zu Reaktivitäten zwischen dem Tränkungsmedium, dem Naturstein, dem Stahl und dem Beton führen. Dies ist besonders für die weitere Schädigung des Marmors von Bedeutung, da diese Gesteinsart besonders anfällig für Schädigungen bei geringen Temperaturen und entsprechender Feuchtigkeit ist.

Diese Vorarbeiten sollen die Erstellung praxisverwertbare Gesamtkonzepte für die Generalplanung unter Leitung der ARGE Dr. Pfanner ermöglichen. Das Gesamtkonzept mit Leistungsverzeichnissen für diverse Gewerke soll bereits im März 2004 vorliegen. <

# Anlage 2

## Bestandsglossar

ARGE Speiser & Endemann





berlin, staatliche museen zu berlin,  
markttor von milet

bestandsglossar

Blatt 1 BG – Blatt 23 BG

■■■ bestandsglossar

Blatt 1 BG



Steinmaterial

Metamorphe Gesteine

Marmor

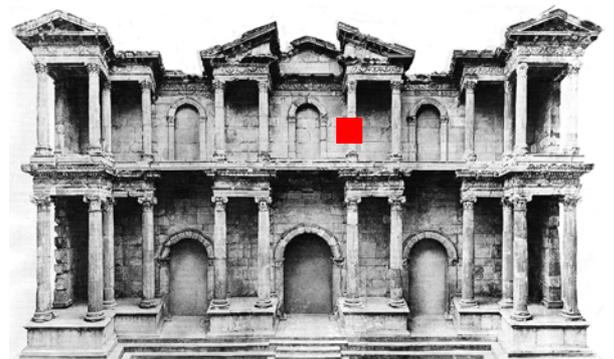
Mittel bis feinkörniger Marmor

Farbe: weiß bis milchig trüb mit grauer und gelblicher Äderung.

Aufnahmebereich: OG, Rückwand

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 20



Kartierungssymbol:



Aufnahmebereich: Oben: linke Bauhälfte, OG  
h: OG  
Unten: linke Bauhälfte, OG

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: oben : 11  
unten: 12

Kartierungssymbol:  
l:

Steinersatzstoffe

Ergänzungsmörtel

Mörtel 1

Mörtel aus der Zeit der Wiederrichtung (1928) im Museum.

Makroskopische Beschreibung

Zweischichtiger Mörtelaufbau aus grobem Unterputz und feinkörnigem Deckputz.  
Unterputz: Mittel- bis feinkörniger, poriger Putz, bräunlich. Korn scharfkantig bis gerundet.  
Deckputz: Weißer Steinersatzstoff mit kristallinen Bestandteilen. Mittel bis feinkörnig, hart und dicht. Korn scharfkantig bis angerundet.

Makroskopische Beobachtung

Häufige Krakelee- und Rissbildungen. Häufig hohl liegend. Oberflächen verschmutzt.





Steinersatzstoffe

Ergänzungsmörtel

Mörtel 2

Reparaturmörtel aus der Zeit nach dem Weltkrieg II (50er Jahre) im Museum (vergl. auch Blatt 19BG).

Makroskopische Beschreibung

Einschichtiger Putzaufbau.

Mittel- bis feinkörniger, poriger Putz, gelblich bis bräunlich. Korn gerundet, weich bis sandend.

Makroskopische Beobachtung

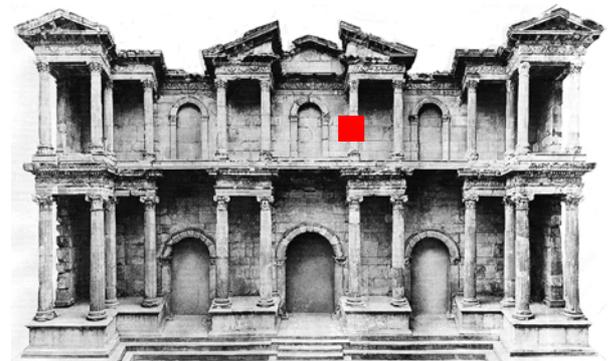
Oberflächen rau, grob abgezogen, meist verschmutzt. Auch als Steingussmaterial eingesetzt.

Aufnahmebereich: Linke Bauhälfte, OG,  
h:

Rückwand

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 8



Kartierungssymbol:  
l:



Steinersatzstoffe

Ergänzungsmörtel

Mörtel 3

Reparaturmörtel aus der Zeit nach dem Weltkrieg II (50er Jahre) im Museum (vergl. auch Blatt 20 BG).

Makroskopische Beschreibung

Einschichtiger Putzaufbau.

Mittel- bis feinkörniger, poriger Putz, Matrix grau, mit gelblichen und rötlichen, schamottartigen Einschlüssen.

Makroskopische Beobachtung

Oberflächen geglättet, in Form gegossen, meist farbig gestrichen, oberflächlich verschmutzt.

Aufnahmebereich: OG, re. Resalit,  
h:

Säulentrommel

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 24



Kartierungssymbol:  
l:



Fugenmörtel / Versetzmörtel

Fugenmörtel

Mörtel 1

Fugenmörtel aus der Zeit der Wiederrichtung des Markttors (1928) im Museum.

Makroskopische Beschreibung

Einschichtiger Putzaufbau.

Mittel- bis feinkömiger, poriger Putz, gelblich bis bräunlich. Korn gerundet, weich bis sandend.

Makroskopische Beobachtung

- Oberflächen rau, grob abgezogen, meist verschmutzt.

Aufnahmebereich: OG, li. Resalit

Rückwand

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 39



Kartierungssymbol



Fugenmörtel / Versetzmörtel

Fugenmörtel

Mörtel 2

Reparaturmörtel aus der Zeit nach dem Weltkrieg II (50er Jahre) im Museum (vergl. auch Blatt 19SG).

Makroskopische Beschreibung

Mittel- bis feinkörniger, poriger Mörtel, grau bis bräunlich. Korn gerundet, weich bis sandend.

Makroskopische Beobachtung

Oberflächen rau, grob abgezogen, meist verschmutzt

Aufnahmebereich: OG, rechter Resalit  
Säulentrommel

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 24



Kartierungssymbol:



Konstruktion

Metallarmierungen

Eisen / Stahl – T – Träger  
Konstruktionshilfen aus der Zeit der  
Wedererrichtung des Markttors (1928) im  
Museum.

Aufnahmebereich: Mittelresalit, OG,  
h:

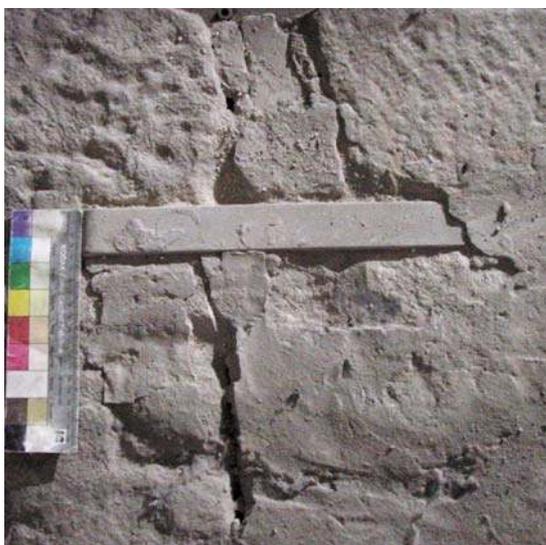
Zwischendecke

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 12

Kartierungssymbol:  
l:





Konstruktion

Metallarmierungen

Eisenklammern  
Konstruktionshilfen aus der Zeit der  
Wedererrichtung des Markttors (1928) im  
Museum.

Aufnahmebereich h: OG, rechte Bauhälfte

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 30

Kartierungssymbol:  
l:



■■■ bestandsglossar

Blatt 9BG



Konstruktion

Mineralische Baustoffe

Ziegel  
Roter Brandziegel.

Aufnahmebereich: OG, rechte Bauhälfte,  
h:

Rückwand re

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 28

Kartierungssymbol:  
l:





Versetzhilfen / Befestigungshilfen

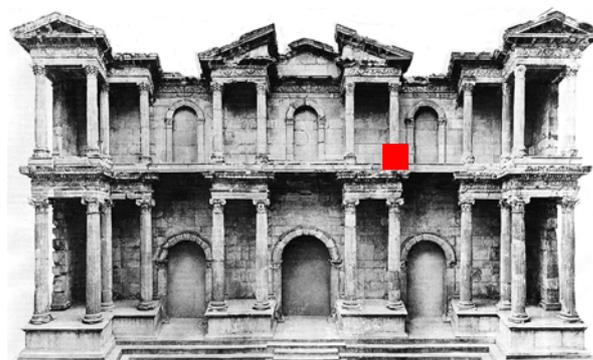
Holzkeile  
Versetzhilfen aus Holz in Keilform.

Aufnahmebereich: OG, Mittelresalit,  
h:

Säulenbasis

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 23



Kartierungssymbol:  
l:



Versetzhilfen / Befestigungshilfen

Hartkarton / Papier  
Abstandshalter aus Hartfaserkarton.

Aufnahmebereich: Linke Seite, OG,  
h:

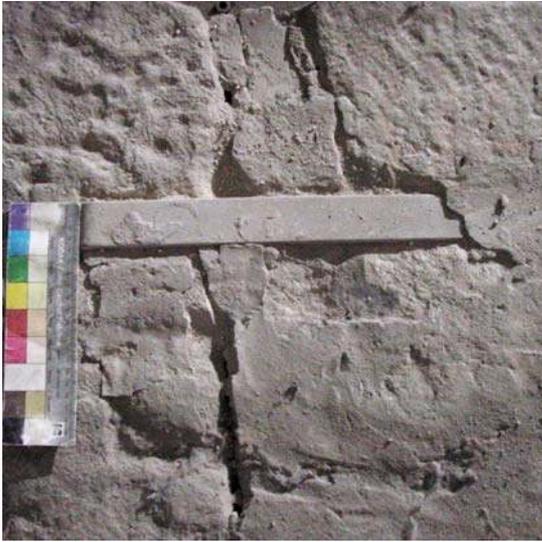
Säule

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 13



Kartierungssymbol:  
l:



Versetzhilfen / Befestigungshilfen

Eisenklammern / Eisendübel  
Eisenklammern und Eisendübel als  
Bewehrungen.



Aufnahmebereich:    Oben: OG, rechte  
                          Bauhälfte  
                          Unten: OG, Mitte,  
                          Rückwand

Aufnahmedatum:    27. März 2002

Dia-Nummer:        30 und 21



Kartierungssymbol:



Oberflächenbearbeitung

Marmor

Werkzeugspuren

An den Steinoberflächen lassen sich Spuren verschiedener Werkzeuge nachweisen.

Spitzeisen

In nicht sichtbaren Bereichen der Schauseite des Markttors finden sich auch grobe Werkzeugspuren. Die Oberflächen der Marmorblöcke wurden mit Spitzeisen grob eingeebnet. Es lassen sich zwei verschiedene gespitzte Oberflächen unterscheiden: fein- und grobgespitzt.

Aufnahmebereich: OG, rechte Bauhälfte, Rückwand rechts

Aufnahmedatum: 27. März 2002

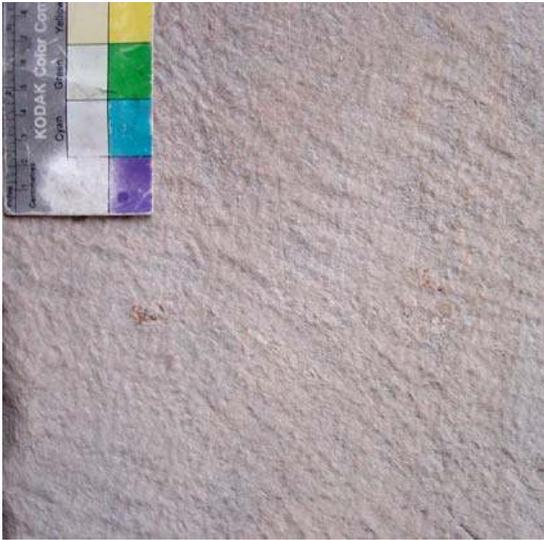
Dia -Nummer: 32

Kartierungssymbol:



■■■ bestandsglossar

Blatt 14 BG



Oberflächenbearbeitung

Marmor

Werkzeugspuren

An den Steinoberflächen lassen sich Spuren verschiedener Werkzeuge nachweisen.

Zahnbeil

Die grob vorgearbeiteten Marmoroberflächen sind mit einem gezahnten Fläche eingeebnet worden.

Aufnahmebereich UG, li. Resalit, Rückwand  
ch

Aufnahmedatum 28 März 2002

Dia-Nummer 53

Kartierungssymbol





Oberflächenbearbeitung

Marmor

Werkzeugspuren

An den Steinoberflächen lassen sich Spuren verschiedener Werkzeuge nachweisen.

Zahneisen

Die erste Glättung der grob vorgearbeiteten Steinoberflächen wurde mit verschiedenen Zahneisen vorgenommen. Die Zahneisen unterscheiden sich durch verschieden weite Zahnabstände (Werkzeugbreite 2,5 – 5 cm, 4-5 Zähne).



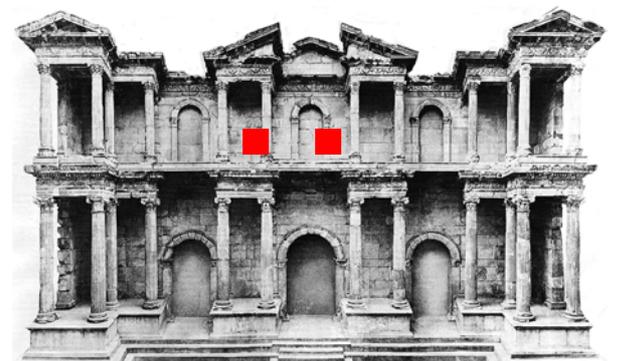
Aufnahmebereich: Oben: OG, Säule, Mittel-

ch: resalit, linke Seite

Unten: OG, Rückwand

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 36 und 34



Kartierungssymbol:

Oberflächenbearbeitung

Marmor

Werkzeugspuren

An den Steinoberflächen lassen sich Spuren verschiedener Werkzeuge nachweisen.

Vierteisen / Glätteisen

Die Glättung der Oberflächen wurde mit Vierteisen erreicht (Werkzeugbreite ).

Aufnahmebereich:

Aufnahmedatum:

Dia-Nummer:

Kartierungssymbol:





Oberflächenbearbeitung

Marmor

Werkzeugspuren

An den Steinoberflächen lassen sich Spuren verschiedener Werkzeuge nachweisen.

Schleifwerkzeuge

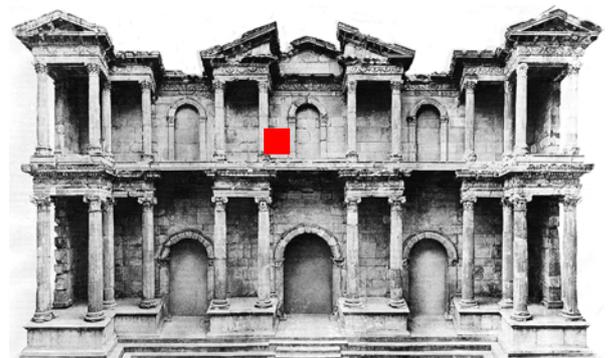
Die Endglättung der Oberflächen wurde mit Schleifwerkzeugen erreicht.

Aufnahmebereich: OG, Mittelresalit, Säule  
h:

Aufnahmedatum: 28 März 2001

Dia-Nummer: 58

Kartierungssymbol:  
l:





Oberflächenbearbeitung

Marmor

Werkzeugspuren

Ritzungen

Reißnadel

Aufriss von Werkstücken durch Ritzungen.

Aufnahmebereich Säulentrommel, rechter  
ch

Seitenflügel, OG

Aufnahmedatum 27. März 2002

Dia-Nummer 31



Kartierungssymbol



Oberflächenbearbeitung

Putz

Werkzeugspuren

Die Putzoberflächen in den Wandbereichen sind mit Kratztechniken gestaltet. (vergl. Blatt 19 und X BG)

Kammähnliches Kratzwerkzeug

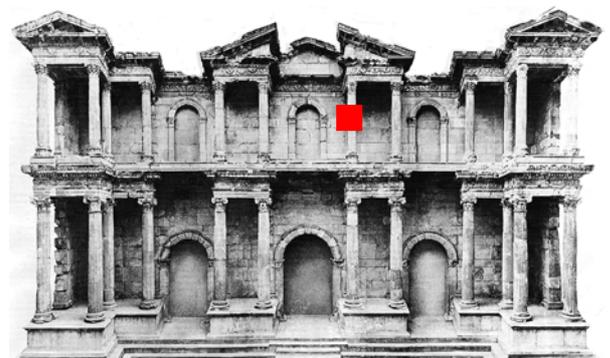
In den frischen Putz ist mit einem kammähnlichen Werkzeug eine netzartige Struktur geritzt worden.

Aufnahmebereich: Bauwerk, Mitte, OG  
h:

Rückwand

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 9



Kartierungssymbol:  
l:



Oberflächenbearbeitung

Putz

Werkzeugspuren

Putzoberflächen (Ergänzungen) im Bereiche von Säulen und plastische gestalteten Werksteinen sind fein geglättet. (vergl. Blatt 19 BG)



Aufnahmebereich:  
Oben: Säulenbasis  
rechte Bauhälfte, OG  
Unten: Säulentrommel,  
rechte Bauhälfte, OG

Aufnahmedatum:  
27. März 2002

Dia-Nummer: 26 und 24

Kartierungssymbol  
ol





Bauinformationen

Steinmetzzeichen

Reliefartige Ritzungen, evtl. Steinmetzzeichen.

Aufnahmebereich: Rechte Bauhälfte, OG  
h:

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 37

Kartierungssymbol:  
l:





Bauinformationen

Farben / Lasur

Steinlasur

Dünn, lasurartiger, gelbockerfarbener Anstrich.

Aufnahmebereich: OG, li. Resalit  
h:

Säulentrommel

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 43



Kartierungssymbol:  
l:



Bauinformationen

Farben / Anstrich

Lasur auf Putz

Aufnahmebereich: OG, Mittelresalitree

Säulentrommel

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 47



Kartierungssymbol:  
l:

# Anlage 3

## Schadensglossar

ARGE Speiser & Endemann





berlin, staatliche museen zu berlin,  
markttor von milet

schadensglossar / schäden

Blatt 1 SG – Blatt 17 SG

Ablagerungen / Oberflächenveränderungen

Staubablagerungen

Locker anhaftende, meist graue bis schwarze Ablagerungen von Staub, Ruß, Flugasche und Fremdpartikel ohne Einfluß auf das Steingefüge

Schaden

Die Staubablagerungen befinden sich vorwiegend auf Horizontalflächen und teilweise mit der Oberfläche verbacken. Aufgrund des erhöhten Wasserrückhaltevermögens sowie eingelagerter Schadstoffe besteht die Gefahr eines Schadstoffeintrages

Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich

Aufnahmedatum

Dia-Nummer

Kartierungssymbol





Ablagerungen / Oberflächenveränderungen

Feuchtflecken / Effloreszenzen

Locker anhaftende Anlagerung von Salzaaggregaten auf Gesteins- oder Putzoberflächen.

Bei stark hygroskopischen Salzen können sekundär Feuchtigkeitsflecken auftreten die zu Farbvertiefungen führen können.

Schaden

Durch Kristallisationsprozesse der Salze wird das Gefüge des Steins oder Putzes geschädigt

Der erhöhte Feuchtigkeitsgehalt durch hygroskopische Salze führt zu einer verstärkten Anlagerung von Schmutzpartikeln.

Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich: OG, linker Resalit  
h:

Säulenbasis

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 18

Kartierungssymbol:

l:





Ablagerungen / Oberflächenveränderungen

Verfärbungen

Farbveränderung bis hin zu bunten Farben infolge Mineralverwitterung oder Anreicherung / Zufuhr farbgebender Stoffe. Autochthone Färbungen insbesondere durch Eisen- und Manganverbindungen, allochthone Färbungen durch zugeführte Rost- und Kupferlösungen.

Schaden

Durch korrodierende Metallteile kommt es zu Verfärbungen in der Steinoberfläche.

Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich: OG, rechter Resalit,  
h:

Rückwand

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 41



Kartierungssymbol:  
l:



Ablagerungen / Oberflächenveränderungen

Verfärbungen

Verfärbung durch Feuchtigkeitseintrag  
Infolge von Befeuchtungen und/oder  
Feuchtigkeitseintrag werden Schmutzpartikel  
aus dem Gefüge oder von oberflächlich  
aufliegendem Ablagerungen  
aufgeschwemmt, (vergl. Blatt 1SG) der sich  
verstärkt im Verdunstungshorizont anlagert.

Schaden

Meist konzentrisch ausgeformte  
Schmutzanlagerungen

Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich: OG, Linker Resalit,  
h:

Rückwand

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 40



Kartierungssymbol:  
l:



Ablagerungen / Oberflächenveränderungen

Verfärbungen

Bitumenflecken

Schaden  
Oberflächlich aufliegende schwarze,  
teerähnliche Flecken.

Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich: OG, rechter Resalit,  
h:

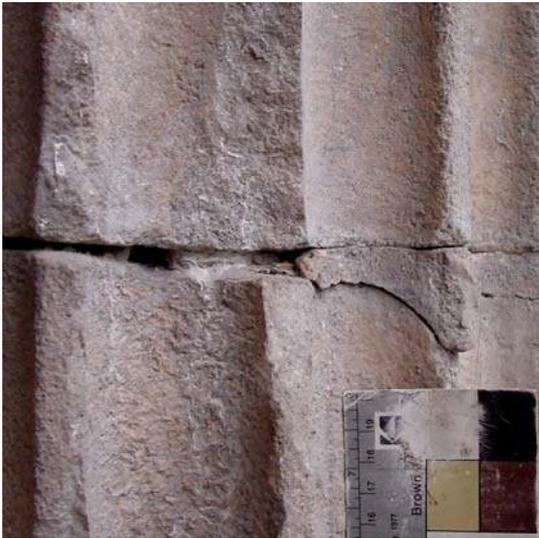
Rückwand

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 55



Kartierungssymbol:  
l:



### Fugenmörtel

Am Markttor von Milet sind verschiedene Typen von Fugenmörteln nachweisbar. Siehe hierzu Blatt 5 und 6 BG im Glossar Bestand.

### Beschädigte bzw. rückgewitterte Fuge

#### Schaden

Gefügearuflockerung des Fugenmörtels mit Materialverlust durch Sanden und Abbröckeln. Entfestigung durch Bindemittelabbau, mechanischen Stress durch Salz- oder Frostspaltung etc. mit der Folge von Rückwitterung.

Dadurch ergibt sich ein höherer Eintrag sowie eine stärkere Belastung der Fugenflanken durch Feuchtigkeit.

### Maßnahmevorschlag

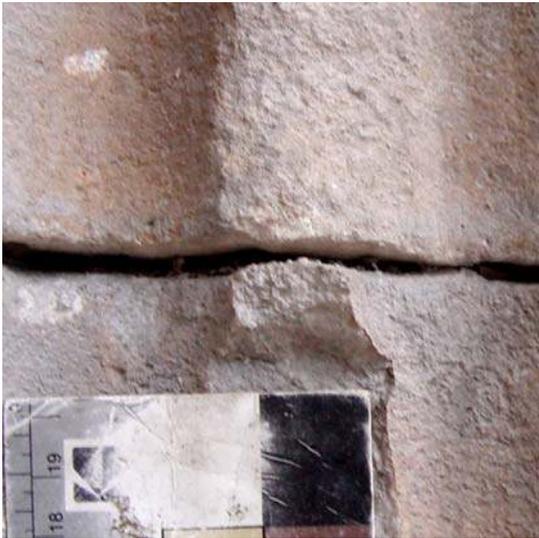
Aufnahmebereich: OG, Mittelresalit Säule

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 49

Kartierungssymbol:





#### Fugenmörtel

Am Markttor von Milet sind verschiedene Typen von Fugenmörteln nachweisbar. Siehe hierzu Blatt 5 und 6 BG im Glossar Bestand, sowie Blatt und SG.

#### Fehlendes Fugenmaterial

##### Schaden

Fugenmaterial bis zu mehreren Zentimetern Tiefe nicht mehr vorhanden. Dadurch ergibt sich ein höherer Feuchtigkeitseintrag sowie eine stärkere Belastung der Fugenflanken durch Feuchte.

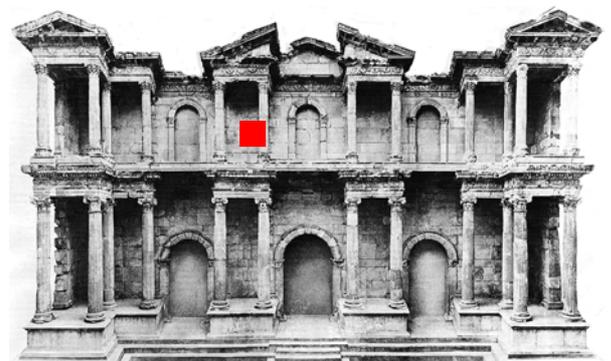
#### Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich: OG, Mittelresalit  
Säule

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 49

Kartierungssymbol:





Anlagerungen / Oberflächenveränderungen

Krusten

Festhaftende Anlagerungen auf der Gesteinsoberfläche

Kruste

Dünne, nicht vollflächige, die Gesteinsoberfläche nachzeichnende Anlagerung mit bräunlich-grauer bis schwarzer Färbung hauptsächlich infolge von Schadstoffdeposition aus der Atmosphäre. Die Oberflächenbearbeitungsspuren und Steinstrukturen sind noch deutlich ablesbar.

Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich:  
h: OG, rechter  
Seitenflügel  
Rückwand

Aufnahmedatum:

Dia-Nummer:

Kartierungssymbol:  
l:





Anlagerungen / Oberflächenveränderungen

Sinterschichten, Sinterkrusten  
Fest anhaftende weiße bis bräunliche oftmals blättereigähnliche Anlagerungen auf der Gesteinsoberfläche,

Schaden  
Durch  
Sinterschichten/krustenoberflächennahen Gefügeeigenschaften des Natursteins deutlich verändert werden. Neben den bauphysikalischen Eigenschaften werden durch die hellen Anlagerungen auch die optischen Eigenschaften verändert.

Sekundär Schäden  
Sinterkrusten können in Ihrem porigen, blättereigartigem Gefüge signifikante Mengen Wasser zurückhalten wodurch das Wachstum von Mikroorganismen gefördert wird.

Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich OG, rechter Seitenflügel

Rückwand

Aufnahmedatum 27. März 2002

Dia-Nummer 15



Kartierungssymbol



Anlagerungen / Oberflächenveränderungen

Anthropogene mineralische Anlagerungen

Mörtelspritzer

Fest anhaftende Mörtelspritzer auf der Gesteinsoberfläche,

Schaden

Neben den bauphysikalischen Eigenschaften werden durch die hellen Anlagerungen auch die optischen Eigenschaften verändert

Sekundär Schäden

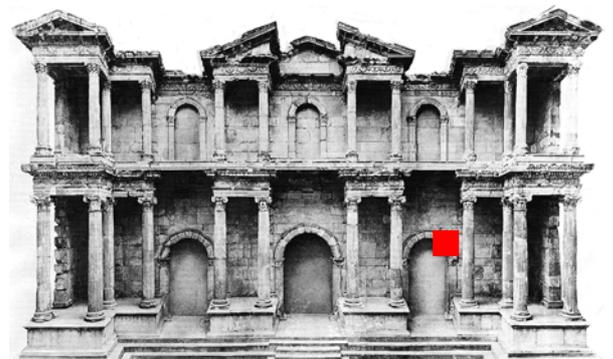
Je nach Bindemittelart und Bindemittelmenge verändern flächige Mörtelreste die physikalischen Oberflächeneigenschaften von Natursteinen. Dies gilt besonders für vorgeschädigte Oberflächen. Durch die Veränderungen Oberflächeneigenschaften kann es zu einer Akkumulation von Schadstoffen in diesen Bereichen kommen die in der Folge Gefügeveränderungen des Natursteins bewirken.

Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich: UG, rechter Seitenflügel, Kapitell Torgewände

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 5



Kartierungssymbol:



### Schalen – Marmor

Ablösen von größeren, flächigen Gesteinselementen, parallel zur Gesteinsoberfläche, meist einlagig.

### Schaden

Schalenbildung führt zu deutlichem Materialverlust. Die Schalenstärken variieren von ca. 1mm bis zu 20mm. Das Gefüge der Schalendecken kann in sich entfestigt sein. Hinter / unter Schalen kann das Gefüge des Gesteins gestört sein (Zuckern, Mehlen vergl. Blatt 12 SG).

### Sekundärer Schaden

An den Ablösepunkten der Schalen entstehen meist Risse. Durch den Verlust von Schalenbestandteilen entstehen Fehlstellen.

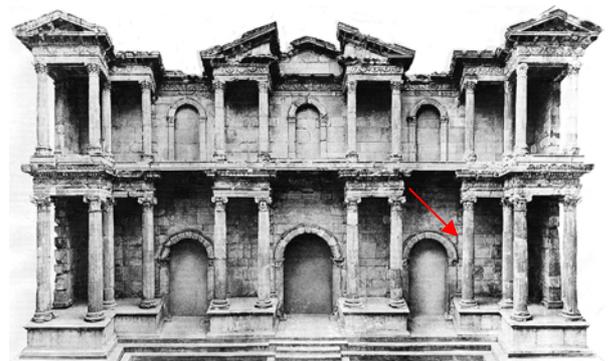
### Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich: UG, rechter Resalit, Säule

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 1

Kartierungssymbol:





### Bröckelnder Zerfall / Zuckern

Ablösen von kleinen isometrischen Kornaggregaten (splitförmig).

#### Schaden

Starke Veränderung des Steingefüges. Die Matrix des kristallinen Marmors ist bis in mehrerer Millimeter Tiefe entfestigt. Es lösen sich größere Gesteinsstücke. Ein Zusammenhalt im Steingefüge ist nicht mehr gegeben. Das Steingefüge bröckelt. Diese Verwitterungsform kann auch unter oberflächlichen Anlagerungen und Beschichtungen auftreten.

#### Sekundärer Schaden

Durch bröckelnden Zerfall des Gesteins entsteht ein Materialverlust in Form von Fehlstellen. Durch das veränderte Gefüge werden gesteinspezifische Eigenschaften verändert.

#### Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich: UG, rechter Resalit,  
h: Säule

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 1



Kartierungssymbol:  
l:



#### Fehlstelle / Ausbruch

Fehlstelle durch den Verlust kompakter Gesteinsstücke oder natürliche Steinhomogenitäten (Drusen, Kavemen).

#### Schaden

Durch Verwitterungsprozesse, mechanische Beanspruchung oder infolge baukonstruktiver Fehlbelastungen, Vandalismus oder Rostsprengung etc. entstandene Gesteinsverluste.

#### Sekundäre Schäden

Fehlstellen können auch durch Schuppen, Bröckeln, Mehlen und konstruktive Spannungen entstehen (vergl. Blatt 16 und 17 SG).

#### Maßnahmevorschlag

Aufnahmebereich  
h OG, Mittelresalit, Säule

Aufnahmedatum 28 März 2002

Dia-Nummer 42

Kartierungssymbol  
I





Risse

Einzelne oder miteinander verschnittene Trenn- bzw. Bruchflächen in Form von Einzelrissen oder Riss-systemen infolge natürlicher oder baukonstruktiver Veränderungen (statische Belastung, Rostsprengung etc.).

Schaden

Risse und Klüfte im Naturstein von zum Teil mehreren Millimetern Dicke.

Sekundär Schäden

Durch baukonstruktive Fehlbelastungen und Oberflächenverwitterung entstehende Steinablosungen in Form von Schalen und Ausbrüchen.



Maßnahmenvorschlag

-

Aufnahmebereich: oben: UG, Rückwand, h:

rechter Resalit  
unten: Gebälk  
Mittelresalit

Aufnahmedatum:

Dia-Nummer: unten 25



Kartierungssymbol:

l:





Ergänzungen

Beschädigte oder schädigende Ergänzungen und Vierungen

Schaden

Mürbe, bzw. im Gefüge stark geschwächte und/oder sich an der Kontaktfläche ablösende Mörtelergänzung.

Sekundäre Schäden

Durch korrodierte Metalldübel und Bewehrungen können Risse und Sprünge im angrenzenden Steinmaterial auftreten.

Maßnahme

Aufnahmebereich:  
h:

UG, rechter Resalit  
Rückwand

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 55

Kartierungssymbol:  
l:





Polychromie

Anstriche / Lasuren

Abblättermde Anstriche  
Neuzeitliche Anstriche zeigen Schäden in Form  
von Abblättern.

Aufnahmebereich: OG, linker Resalit, Säule  
h:

Aufnahmedatum: 28 März 2002

Dia-Nummer: 47

Kartierungssymbol:  
l:



■■■ schadensglossar



Polychromie

Graffiti

Aufnahmebereich: UG, rechter Resalit, Säule

Aufnahmedatum: 27. März 2002

Dia-Nummer: 3

Kartierungssymbol:



# Anlage 4

Schadenskartierung

ARGE Speiser & Endemann



“Das Markttor von Milet:  
Schadensanalyse und modellhafte Sanierungskonzepte”

**Teilprojekt:**  
**Dokumentation und Interpretation der Kartierungen am Markttor von**  
**Milet**  
**Pergamonmuseum/Berlin**

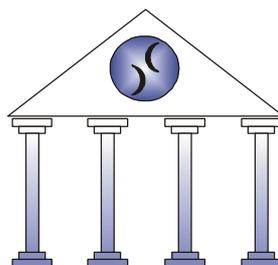
Durchführung:

**ARGE**

Beratende Geologen und Restauratoren (Rest. S. Speiser, Dipl. Geol. P. Nordhoff)

**&**

Steinwerkstatt (Dipl. Rest. S. Endemann)



Restaurator

Sebastian Speiser

Beratende Geologen und Restauratoren

Matthiasstr. 10

D-10249 Berlin



---

steinwerkstatt

Dipl. Restaurator  
 Sebastian Endemann  
 Steinwerkstatt  
 Restaurierung und Denkmalpflege  
 Auweg 42a  
 D-93055 Regensburg

Inhalt:	Seite
<b>I. Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>II. Methodisches Vorgehen</b>	<b>3</b>
II. 1 Literatur- und Kartenrecherche	3
II. 2 Erstellung des Glossars	4
II. 3 Kartiergrundlagen	5
II. 4 Kartierungen und Festlegung der Kartier-/Musterachse	7
<b>III. Befunde und Interpretation</b>	<b>8</b>
III.1 Materialbestand	8
III.1.1 Antiker Marmor	9
III.1.2 Mörtel und Marmor der 20'er Jahre	9
III.1.3 Mörtel der 50'er Jahre	10
III.1.4 Oberflächenbearbeitung/Werkzeugspuren	10
III.1.5 Lasuren	10
<b>III.2 Schadensbestand</b>	<b>11</b>
III.3 Bewertung der Schadenskartierung	11
III.3.1 Krusten	11
III.3.2 Rißsysteme	12
III.3.3 Gefügeschäden	13
III.3.4. Fehlstellen/Ausbrüche	15
<b>IV. Fazit und Ausblick</b>	<b>15</b>
<b>V. Anhang</b>	
Glossar	
Karten zur Material- und Schadensbestandsaufnahme	

## **I. Einleitung**

Die Kartierungen zur Bestands- und Schadensanamnese des Markttores von Milet wurden im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projektes "Das Markttor von Milet: Schadensanalyse und modellhafte Sanierungskonzepte" (AZ 18686-45) durchgeführt.

Zentrales Anliegen ist die exemplarische Erfassung und kartographische Visualisierung aller am Objekt auftretenden Material- und Schadensvariationen zwecks Beurteilung des aktuellen baulichen Zustandes aus restauratorischer Perspektive. Desweiteren werden alle von unseren Projektpartner/-innen am Objekt durchgeführten Untersuchungen nur vor dem Hintergrund fundierter Material- und Schadensaufnahmen erhellt. Die Kartierungen entstanden in enger Kooperation mit der Arbeitsgruppe "Strukturgeologie und Geodynamik" des Geowissenschaftlichen Zentrums Göttingen (Prof. Dr. S. Siegesmund), dem Pergamonmuseum (Staatl. Museen zu Berlin Preußischer Kulturbesitz) und der Firma Octocom AG um B. Strackenbrock (Berlin). Die Vor-Ort Kampagnen wurden unter Absprache mit dem Museums an die besuchsfreien Zeiten des Pergamonmuseums angepaßt und im Laufe des vergangenen Kalenderjahres (2002) durchgeführt.

## **II. Methodisches Vorgehen**

### II.1 Literatur- und Kartenrecherche

Die Auswertung des vom Pergamonmuseum freundlicherweise zur Verfügung gestellten (historischen) Karten- und Literaturmaterials ergab einen Überblick über die zu erwartenden Problembereiche des Objektes:

1. Sämtliche Säulen wurden während der Aufbau- und Rekonstruktionsphase in den zwanziger Jahren des 20. Jhds. entkernt, mit Eisenarmierungen versehen und vermutlich mit Beton ausgegossen. Weiterhin sind neben den Originalteilen aus

Marmor Gipsergänzungen, Ziegelwände und Eisenarmierungen eingebracht worden, die aufgrund unbekannter aber mit Sicherheit unterschiedlicher Materialkennwerte die Voraussetzungen für möglicherweise multivariable Schädigungen erfüllen.

2. Während des zweiten Weltkrieges wurde das Tor trotz Schutzummauerung schwer beschädigt und mußte erneut umfangreich restauriert werden. Für die nachkriegszeitlichen Restaurierungs- und Instandsetzungsarbeiten liegen keinerlei Dokumente über die dabei verwendeten Werkstoffe vor.

3. Die jahrzentelangen Auswirkungen der besonderen Innenraumbedingungen und der großen Publikumsmengen in Kombination mit den unterschiedlichen Werkstoffen unbekannter Zusammensetzung und Konstruktionen ergibt ein aus restaurierungstechnischer Perspektive problematisches Wirkungsgefüge.

## II.2 Erstellung des Glossars

In einer ersten Kampagne wurde der Materialbestand und die Schadensphänomene (semi-) quantitativ ermittelt und in einem Glossar kompiliert (s. Anhang). Hierzu wurde das gesamte Tor sowohl vom Baugerüst als auch durch direkte Begehung in Bezug auf makroskopischen Schäden bzw. deren schadensbildenden Merkmale und auf verwendete Werk- und Baustoffe untersucht. Die jeweiligen makroskopischen Befunde wurden exemplarisch und digital photographiert. Die Lokalisierung wurde über eine Markierung in einem Panoramabild des Tores durch Markierung gewährleistet. Um eine hohe Kontrasttiefe der Nahaufnahmen zu erreichen, erfolgte eine Ausleuchtung der Photoausschnitte über mehrere Tageslicht-Scheinwerfer. Die weitere Farbkalibration und Optimierung der Auflösung nahmen wir Vor-Ort mittels handelsüblicher Photoverarbeitungssoftware vor.

Auf Basis des Glossars wurde zum einen die Legende für die Kartierung festgelegt und zum anderen die Position der Musterachse bestimmt.

### II.3 Kartiergrundlagen

Die Kartiergrundlagen für die Musterachse wurden von der Firma Octocom AG erarbeitet. Grundsätzlich wurde hierbei ein verformungsgerechtes Aufmaß des Tores erstellt, das die Maße des Objektes nicht schematisiert, sondern die genaue Beschaffenheit und Raumlage

der Bauelemente entzerrt wiedergibt. Die Koordinaten des Bauwerks werden dabei mit einem Rotationslaser abgetastet, vermessen und sofort digitalisiert. Das methodische Vorgehen wird hier kurz zitiert (Firma Octocom AG):

---

Für die gegenseitige Orientierung aller Aufnahmen wurde im Miletsaal des Pergamonmuseums ein lokales Koordinatensystem angelegt und durch Klebmarken signalisiert. Anschließend wurde die Panoramaaufnahme aufgenommen.

#### Arbeitsschritt 1

Orientierung aller Scans im übergeordnetem Koordinatensystem als Basis der weiteren gemeinsamen Bearbeitung.

#### Arbeitsschritt 2

Manuelles freistellen der Gerüsteile in den Scans um unnötige Reflexionen und Verdeckungen zu vermeiden.

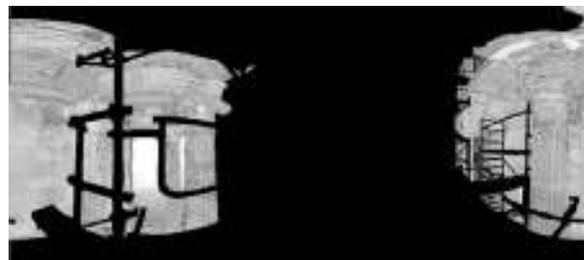
#### Original

#### Bearbeitet

#### Arbeitsschritt 3

Umrechnen der polaren Scans in bevorzugte Ansichtsrichtungen.

Ursprünglich liegen alle 3D Scans in einem Polarem Koordinatensystem mit gleicher Winkelauflösung fest. Ein realer Punkt im Pohl kann somit bis zu 36.000 Pixeln im Scan entsprechen. Um derartige redundante Information zu verringern werden jeweils mehrere



Scans in einen neuen „Linescan“ mit orthogonaler Geometrie überführt.

Für die Probeachse wurden 12 Linescans mit 5mm Auflösung am Objekt gebildet.



Abb. Arbeitsschritt 3

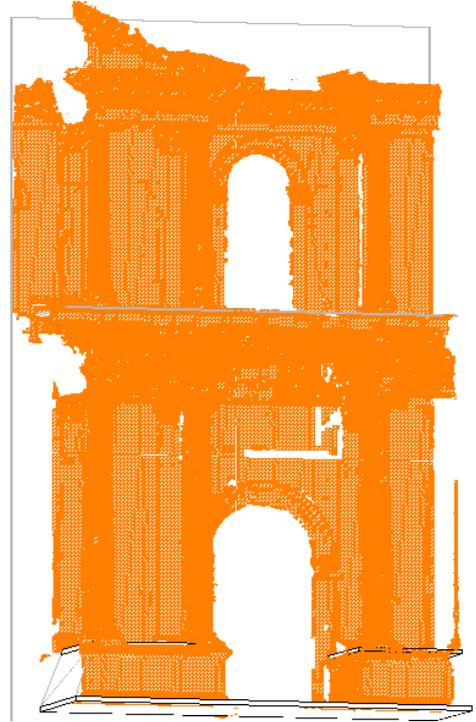


Abb. Arbeitsschritt 4

#### Arbeitsschritt 4

Berechnung eines Oberflächenmodells durch dynamische Dreiecksvermaschung.

Alle Linescans werden nun in Dreiecksmaschen umgerechnet, wobei abhängig von der Krümmung am jeweiligem Ort größere oder kleinere Dreiecksmaschen gebildet werden.

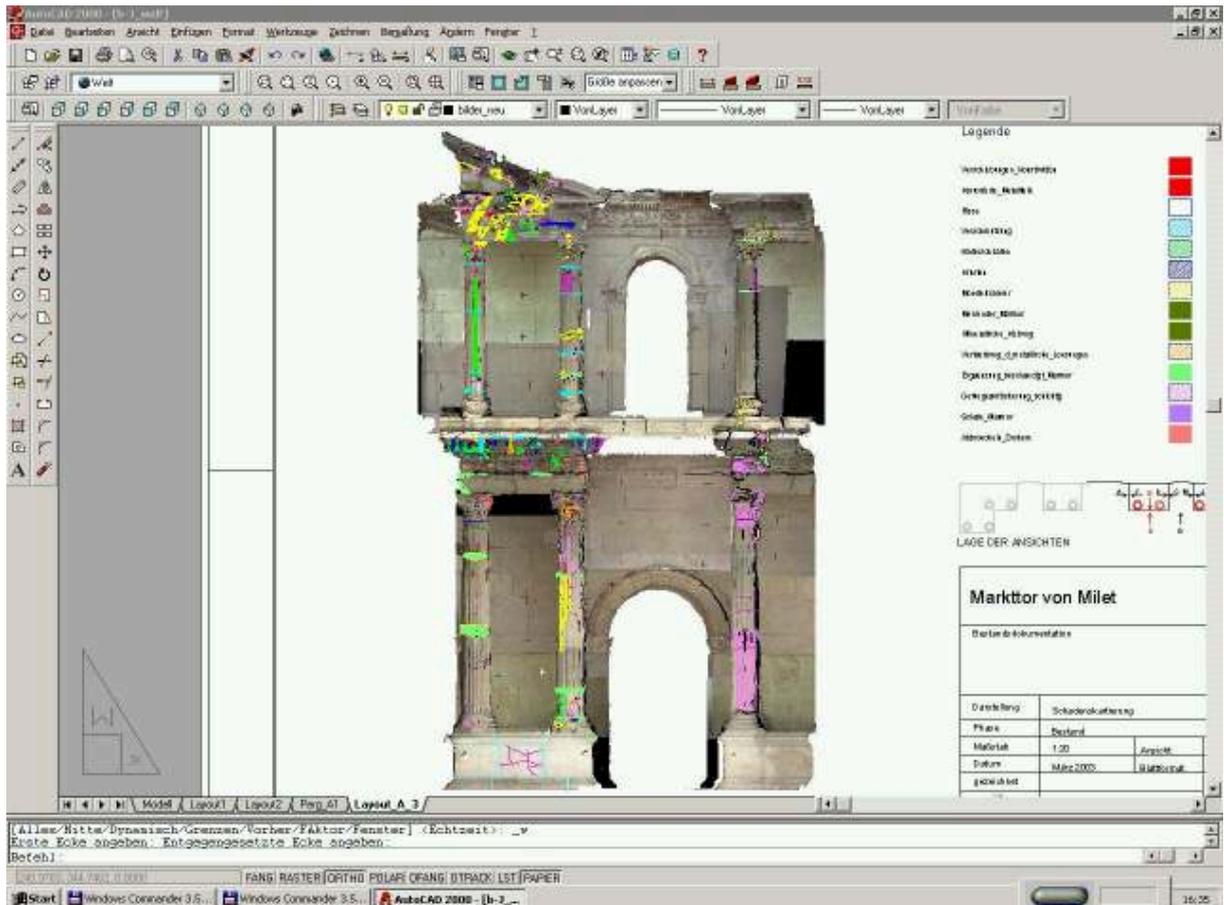
Insgesamt wurden für die Probeachse 1.385.000 Maschen mit Größen zwischen 0,25 und 100 qcm gebildet.

Das Modell mußte zur Eliminierung übriggebliebener Verdeckungen durch Gerüstbauteile manuell in einigen Bereichen editiert werden.

#### Arbeitsschnitt 5

Farbige Texturierung des Oberflächenmodells.

Das Dreiecksmaschenmodell wurde mit einem Mosaik aus den Reseaubildern und dem Panorama farbig texturiert. Dazu wurden von allen Bildern die äußere Orientierung im Arbeitskoordinatensystem berechnet und jedes Dreieck durch Raytracing mit je einem Bildausschnitt aus dem gesamten Mosaik der am günstigsten zum Flächennormalenvektor stand belegt, oder mit dem Grauwert aus den Laserscans versehen.



#### II.4 Kartierungen und Festlegung der Kartier-/Musterachse

Im Zuge der Literaturrecherche, der Auswertung alter Bau- und Planskizzen und der zusammenfassenden, makroskopischen Dokumentation bei der Erstellung des Glossars wurden die grundlegenden Randbedingungen für die genaue Lokalisation der Musterachse erarbeitet:

Dabei sollten zum einen exemplarisch (i.) alle das Objekt bauteiltechnisch charakterisierenden Architekturelemente erfaßt werden. Zum anderen sollte der komplette Materialbestand (ii.) sowie das gesamte am Tor auftretende Schadensinventar (iii.) vorliegen. Die letztlich definierte Musterachse liegt darüber hinaus zusätzlich im Schnittstellenbereich zwischen einer durch einen Bombentreffer stark geschädigten Zone und einem durch den II. Weltkrieg wenig geschädigten

Bereich. Diese Normierung auf „Kriegsschäden“ bzw. auf „Nicht-Kriegsschäden“ kann womöglich Aufschluß darüber geben, inwiefern Alterationen durch „normale“ Umgebungsbedingungen (Innenraum, Besuchsaufkommen, Materialunverträglichkeiten) oder durch (in-) direkte Einwirkungen des Bombentreffers verursacht wurden. Auch wäre eine Triggerung im Sinne von Wegbarmachung über die schockartige Ausbildung von Rissen und Rißsystemen in Folge des Impaktes mit anschließender Bewetterung denkbar.

Die digitalisierte Kartiergrundlage wurde in spezielle Touchscreen-Notebooks hochgeladen, so daß vor Ort die Befunde der Kartierung direkt eingelesen werden konnten. Mittels einer speziell auf restauratorische Belange umgeschriebenen Autocad-Software wurden die Befunde der Materialbestands- und Schadenskartierung direkt auf die digitalisierte Kartengrundlage eingetragen. Diese Methode hat den Vorteil der ständigen Online-Überprüfbarkeit und der Vermeidung von Übertragungsfehlern, die bei der Übertragung der Kartierung vom Papier auf eine bspw. gescannte Kartengrundlage vorkommen können.

### **III. Befunde und Interpretation**

#### III.1 Materialbestand

Die Aufnahme des Materialbestandes während der Kartierung ergab eine zeitliche Abfolge der während der Aufbau- und Restaurierungsphasen verwendeten Baustoffe<sup>1</sup>:

1. antiker Marmor
2. Mörtel und Marmor der 20`er Jahre
3. Mörtel der 50`er Jahre

---

<sup>1</sup> Siehe hierzu auch das Glossar im Anhang

Zusätzlich wurden alle Oberflächenbearbeitungsspuren aufgenommen und bau-/restaurierungshistorisch zeitlich eingeordnet.

In die Materialbestandsaufnahme gingen weiterhin Eisenteile ( Anker, Klammern etc.), Lasuren sowie gesondert alle Originalmarmorteile ein.

Nähere Untersuchungen zum Aufbau der Mörtel (chemisch-physikalisch) und zur Technik der Antragungen sind bis zum jetzigen Zeitpunkt nicht vorgenommen worden.

Folgende Differenzierungen beruhen dabei auf makroskopischen Untersuchungen:<sup>2</sup>

### III.1.1 Der antike Marmor:

Mittel bis feinkörniger Marmor.

Farbe:weiß bis milchig trüb mit grauer und gelblicher Äderung.

### III.1.2 Mörtel und Marmor der 20`er Jahre:

- 1.Marmorimitat-Mörtel (mehrschichtiger Aufbau; Sichtschicht ist feinkörnig, schillernd, glasig bis milchig trüb)
- 2.Gipsabgüsse mit Eisenarmierungen im Bereich der Kapitelle, mit Lasur aus makroskopisch nicht näher bestimmbar Material.
- 3.Marmorplatten im Bereich des Sockels, als Blenden vorgesetzt (ca. 10-12 cm Mächtigkeit).
- 4.Eisenanker/Klammern und Stahlträger in Form von T- oder Doppel-T-Trägern, welche an den Verbindungsstellen vernietet oder verschraubt sind.

---

<sup>2</sup> Nähere Beschreibungen zu den makroskopischen Eigenschaften sind dem im Anhang beiliegenden Glossar zu entnehmen.

### III.1.3 Mörtel der 50`er Jahre:

1. Marmorimitat-Mörtel ( gröberes Erscheinungsbild, nicht näher untersucht).
2. Gipsabgüsse mit Eisenarmierungen im Bereich der Kapitelle, mit Lasur aus makroskopisch nicht näher bestimmbar Material.  
Zementabgüsse von Säulenschäften und Deckenplatten, Lasiert.

### III.1.4 Oberflächenbearbeitung/Werkzeugspuren:

#### Antik:

- Zahnbeil
- Zahneisen
- Vierteleisen/Glätteisen
- Schleifwerkzeuge
- Reißnadel

#### Neuzeitlich:

- Kammähnliches Kratzwerkzeug
- Glätt- und Polierwerkzeuge

Des weiteren sind vereinzelt antike (?) Steinmetzzeichen zu beobachten.

### III.1.5 Lasuren<sup>3</sup>:

1. Steinlasur (zur Homogenisierung/Beruhigung der Oberfläche)
2. Lasur auf Putz und Ergänzungen

---

<sup>3</sup> Eine Datierung und chemische Analyse (Wechselwirkung mit dem Marmor?) der Lasur ist bis Dato nicht erfolgt.

### III.2 Schadensbestand

In der Schadensbestandsaufnahme wurde zwischen folgenden Schäden unterschieden:

- Verschiebungen Konstruktion
- Korrodierte Metallteile
- Risse und Rißsysteme
- Verschmutzungen
- Sinterschichten
- Krusten
- Mörtelschleier
- Mehrender Marmor
- Mineralische Klebungen
- Verfärbungen (metallische Lösungen)
- Ergänzung-Beschädigter Marmor
- Gefügeflockerung schichtig
- Schale Marmor
- Abbröckeln/Zuckern
- Fugen defekt

### III.3. Bewertung der Schadenskartierung

#### III.3.1. Krusten

In mehreren Bereichen des Markttors vor allem unterhalb des oberen Gurtgesimses und im Bereich der oberen Kapitelle und Säulen zeigen sich tuffartige Sinteranlagerungen. Die Sinterschichten sind auf die verwitterte Steinoberfläche angewachsen. Auffallend ist, daß die Sinterschichten fahnenartig unterhalb feiner Haarrisse auftreten. Vermutlich handelt es sich bei den Mineralkrusten um

Calcitanlagerungen. Aufgrund der Ausprägung und Morphologie der Anlagerungen kann davon ausgegangen werden, daß es sich um Auswaschungen von Bindemitteln handelt.

Folgen:

- Bindemittelverlust -> Materialverlust
- Vermutlich großer Wassereintrag
- Korrosion der Bewehrungen (siehe auch metallische Anlagerungen/Verfärbungen)
- Gefügeschäden Naturstein (siehe auch zuckernder Zerfall)

Untersuchungsbedarf:

- mineralogische Zusammensetzung der Sinterschichten
- Bindemittelverlust
- Grad der Karbonisierung der mineralischen Bindemittel
- Zustand der Eisenbewehrungen

III.3.2. Rißsysteme:

Das Originalgesteinmaterial und insbesondere die Säulen sind von einem weitläufigen Rißsystem durchzogen (siehe auch Sinterschichten).

In wenigen Bereichen führen die Risse zu strukturellen Schäden.

Auffallend ist, daß die Rißverläufe hauptsächlich vertikal orientiert sind, was sich durch (i.) das Einwirken statischer Drucklast, (ii.) als Folge der Entkernung während des Aufbaus der 20'er Jahre oder aber sich auch durch (iii.) Versturz während antiker Zeit in Milet erklären ließe.

Folgen:

- Aufweitung des Gefüges
- Bruchgefahr

Untersuchungsbedarf:

- Ursachenforschung für die Rißbildung
- Rißtiefe
- Rißdynamik
- Einfluß des Raumklimas auf das Ausdehnungsverhalten des Calcits

### III.3.3. Gefügeschäden

An zahlreichen Oberflächen des Bauwerks sind deutliche Gefügeschäden zu beobachten. Hierbei handelt sich um eine Gefügeaufweitung des Marmors bei dem sich Steinpartikel in Form von zuckerartigen Kristallen, kleineren Konglomeraten oder chipartiger Materialschuppen lösen. Bei diesem Schadensverlauf ist mit hohem Materialverlust zu rechnen.

Der beschriebene Schaden tritt bisher partiell, in „exponierten“ Bereichen des Bauwerks auf.

Es ist zu vermuten, daß die originalen Werksteine vor der Wiedererrichtung konserviert wurden. Je nach verwendetem Schutzmittel kann eine diffusionsdichte Oberfläche erzeugt worden sein. Hierdurch und verstärkt durch verschiedene Alterungsmechanismen des Bindemittels (Klima, Licht, etc.) können Gefügeschäden hervorgerufen werden. Die Alteration der Bindemittel als Funktion der Zeit kann auch eine von der ursprünglichen Farbe abweichende Verfärbung bewirken. Falls es sich nicht um eine zusätzliche Lasur handelt, kann dies die Ursache für den heute nahezu

einheitlich braungelben Farbton der Marmoroberflächen sein.

Folgen:

- Entfestigung
- Materialverlust

Untersuchungsbedarf:

- Oberflächenzustand (Diffusionsseigenschaften)
- Schutzmittel (Öle, Wachse, Wassergläser etc.)
- Konservierungsmöglichkeiten
- Klima

#### III.3.4. Fehlstellen/Ausbrüche

In exponierten Bereichen zeigen sich Fehlstellen und Ausbrüche. (siehe Glossar s).

Folgen:

- Gefährdungen des Bestandes
- Verkehrssicherheit

#### **IV. Fazit und Ausblick**

Die Kartierungen für die Material- und Schadensbestandsaufnahme wurden an einer Musterfläche des Markttores von Milet durchgeführt und liegen sowohl in digitaler als auch in ausgedruckter Form vor. Das Kartenmaterial gibt dabei die räumliche Verbreitung der in der Musterfläche vorkommenden Phänomene wieder, daß Glossar stellt dabei einen engen Bezug zur detaillierten, makroskopischen Identifizierung her. Weitere in diesem Projekt erhobenen Daten, aber auch zukünftige Untersuchungen sind somit in den Gesamtkontext der beobachteten Material- und Schadensverteilung einbindbar.

Als zentrales Ergebnis der von uns durchgeführten Arbeiten ist die eindeutige Identifizierung der an die Hauptaufbau- und Restaurierungsphasen (antiker Marmor, Mörtel und Marmor der 20`er und Mörtel der 50`er Jahre) des Tores gekoppelten Werkstoffe. Die qualitative Bewertung der angetroffenen Schadensbilder ergibt sich aus der unter III.3 getroffenen Hierarchie und Zusammenfassung der einzelnen Punkte (Krusten, Rißsysteme, Gefügeschäden, Fehlstellen).

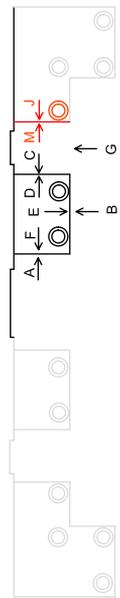
Besonders interessant ist die Beobachtung, daß der mehrschichtige Marmorimitat-Mörtel der 20'er Jahre über deutlich weniger Schäden wie Abplatzungen, Schalenbildungen und Ausbrüche verfügt als der vergleichbare Mörtel, der in der Restaurierungsphase der 50'er Jahre zur Anwendung kam. Vor dem Hintergrund der Kreierung eines Mörtels für zukünftige Restaurierungsarbeiten wäre hier die Ermittlung chemophysikalischer Kennwerte des 20'er Jahre Mörtels aufschlußreich. Resumierend hat sich im Zuge unserer Arbeiten die Komplexität des Bauwerks im Sinne seiner architektonischen, v.a. aber wegen seiner besonderen bauhistorischen Geschichte unter dem Gesichtspunkt des Wandels der Restaurierungstechniken im Verlauf des 20. Jhds. bestätigt.

Zur weiteren Beurteilung des Ist-Zustandes müßten unserer Meinung nach zusammenfassend noch weitere Untersuchungen um folgende Fragenkomplexe herum durchgeführt werden:

1. Welche Wechselwirkungen haben die am Markttor verbauten Materialien langfristig aufeinander (hierzu zählen auch nicht visuell sichtbare, evtl. aber in der Vergangenheit eingebrachte Festigungsmittel)?
2. Wie ist der tatsächliche qualitative Zustand der Stahlstützkonstruktion im Inneren des Baukörpers (Rost, Füllung zwischen Stahl und Marmor)?
3. Wie sind die multiblen Rißbilder, vor allem an den Säulen entstanden (antik: durch den Versturz; beim Ausbohren der Säulentrommeln in den 20`er Jahren; durch die Bombentreffer (direkte und indirekte) im WK II. oder später durch Drucklast)?
4. Wie kam es zur Bildung der Sinter und Schmutzkrusten und welche Auswirkungen haben diese im konkreten Fall auf den Marmor?

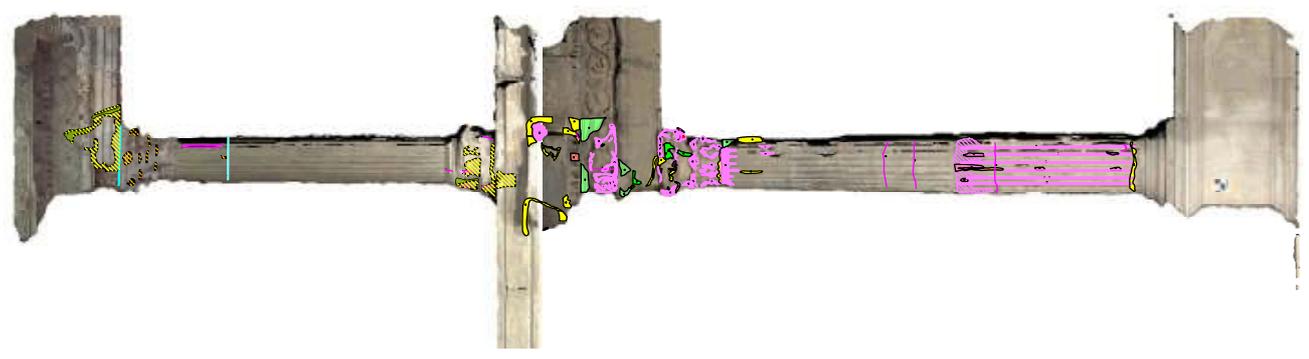
# Legende

-  Verschiebungen\_Konstruktion
-  Korrodierte\_Metallteile
-  Risse
-  Verschmutzung
-  Sinterschichten
-  Krusten
-  Moertelschleier
-  Mehrender\_Marmor
-  Mineralische\_Klebung
-  Verfaerbung\_d\_metallische\_Loesungen
-  Ergaenzung\_beschaedigt\_Marmor
-  Gefuegeauflockerung\_schichtig
-  Schale\_Marmor
-  Abbreckeln\_Zuckern

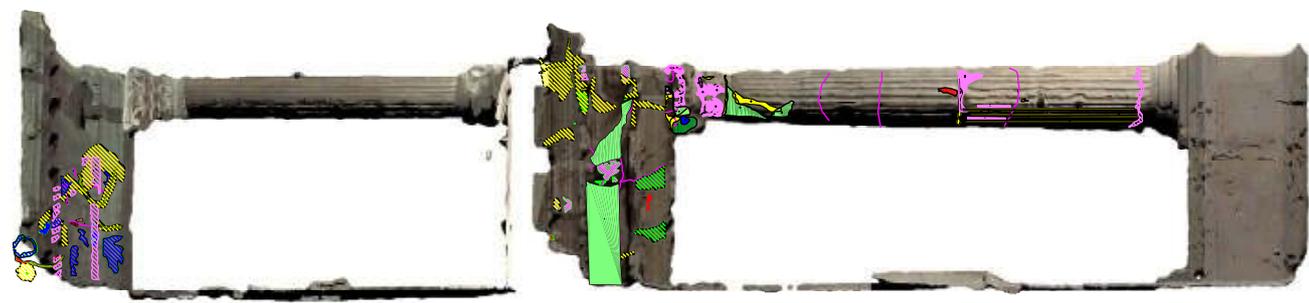


LAGE DER ANSICHTEN

<h2>Markttor von Milet</h2>			
Bestandsdokumentation			
Darstellung	Schadenskartierung		
Phase	Bestand		
Maßstab	1:20	Ansicht	M,J
Datum	März 2003	Blattformat	A3
gezeichnet			
geprüft			
	Blatt-Nr.		4



J



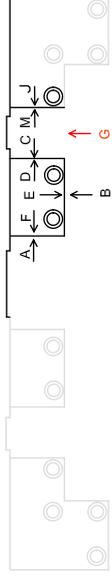
M



G

## Legende

- Verschiebungen\_Konstruktion
- Korrodierete\_Metallteile
- Risse
- Verschmutzung
- Sinterschichten
- Krusten
- Moeretschleier
- Mehlender\_Marmor
- Mineralische\_Klebung
- Verfaerbung\_d\_metallische\_Loesungen
- Ergaenzung\_beschaedigt\_Marmor
- Gefuegeauflockerung\_schichtlig
- Schale\_Marmor
- Abbroeckeln\_Zuckern



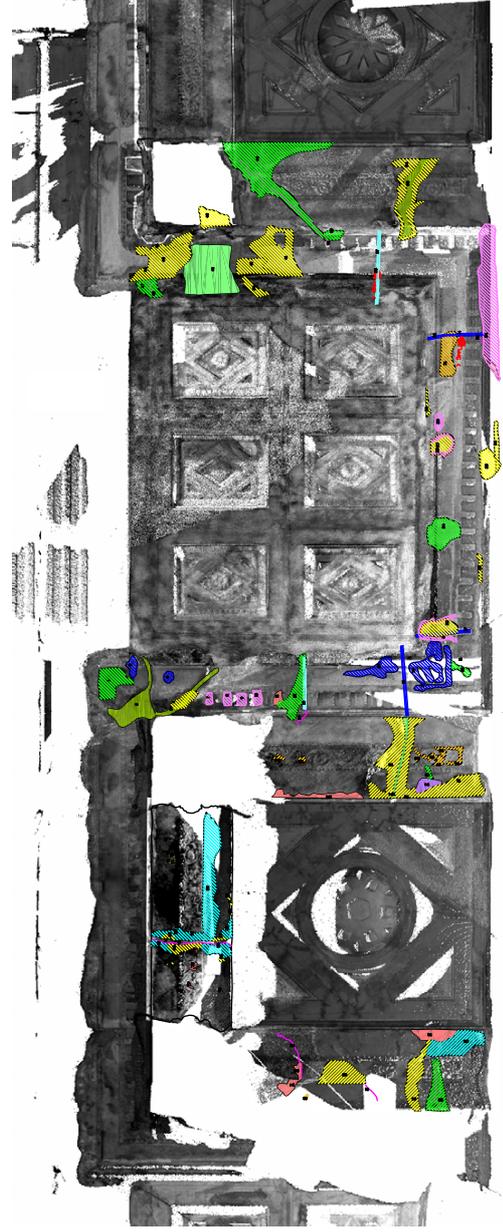
LAGE DER ANSICHTEN

<h1>Markt von Milet</h1>	
Bestandsdokumentation	
Darstellung	Schadenskartierung
Phase	Bestand
Maßstab	1:20 Ansicht G
Datum	März 2003 Blattformat A3
gezeichnet	Blatt-Nr. 5
geprüft	

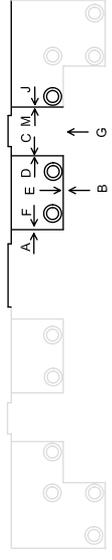


### Legende

- Verschleibungen\_Konstruktion
- Korrodierete\_Metallteile
- Risse
- Verschmutzung
- Sinterschichten
- Krusten
- Moertelschleier
- Mehlender\_Marmor
- Minerallische\_Klebung
- Verfaerbung\_d\_metalliche\_Loesungen
- Ergaenzung\_beschaedigt\_Marmor
- Gefuegeauflockerung\_schichtig
- Schale\_Marmor
- Abbreckeln\_Zuckern



Decke unten



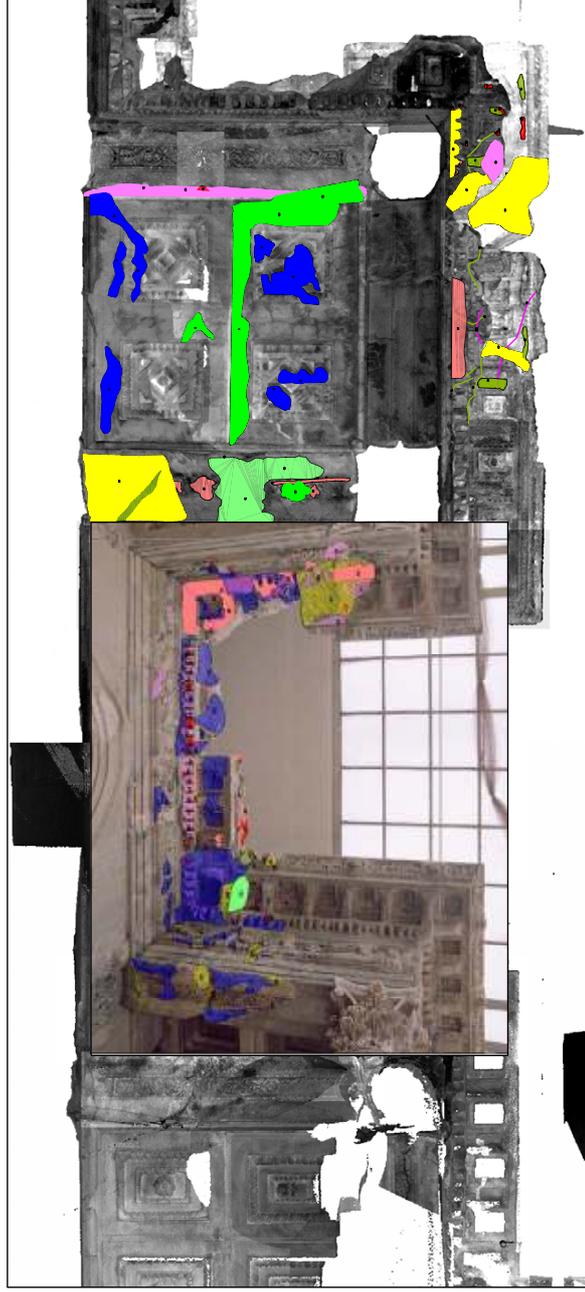
LAGE DER ANSICHTEN

## Markttor von Milet

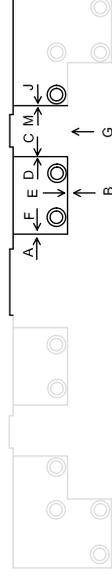
Bestandsdokumentation	
Darstellung	Schadenskartierung
Phase	Bestand
Maßstab	1:20
Datum	März 2003
gezeichnet	Decke
geprüft	A3
	Blatt-Nr.
	5

## Legende

-  Verschleibungen\_Konstruktion
-  Korrodierte\_Metallteile
-  Risse
-  Verschmutzung
-  Sinterschichten
-  Krusten
-  Moerelschleier
-  Mehlender\_Marmor
-  Mineralische\_Klebung
-  Verfaerbung\_d\_metallische\_Loesungen
-  Ergaenzung\_beschaedigt\_Marmor
-  Gefuegeauflockerung\_schichtig
-  Schale\_Marmor
-  Abbroeckeln\_Zuckern



Decke oben



LAGE DER ANSICHTEN

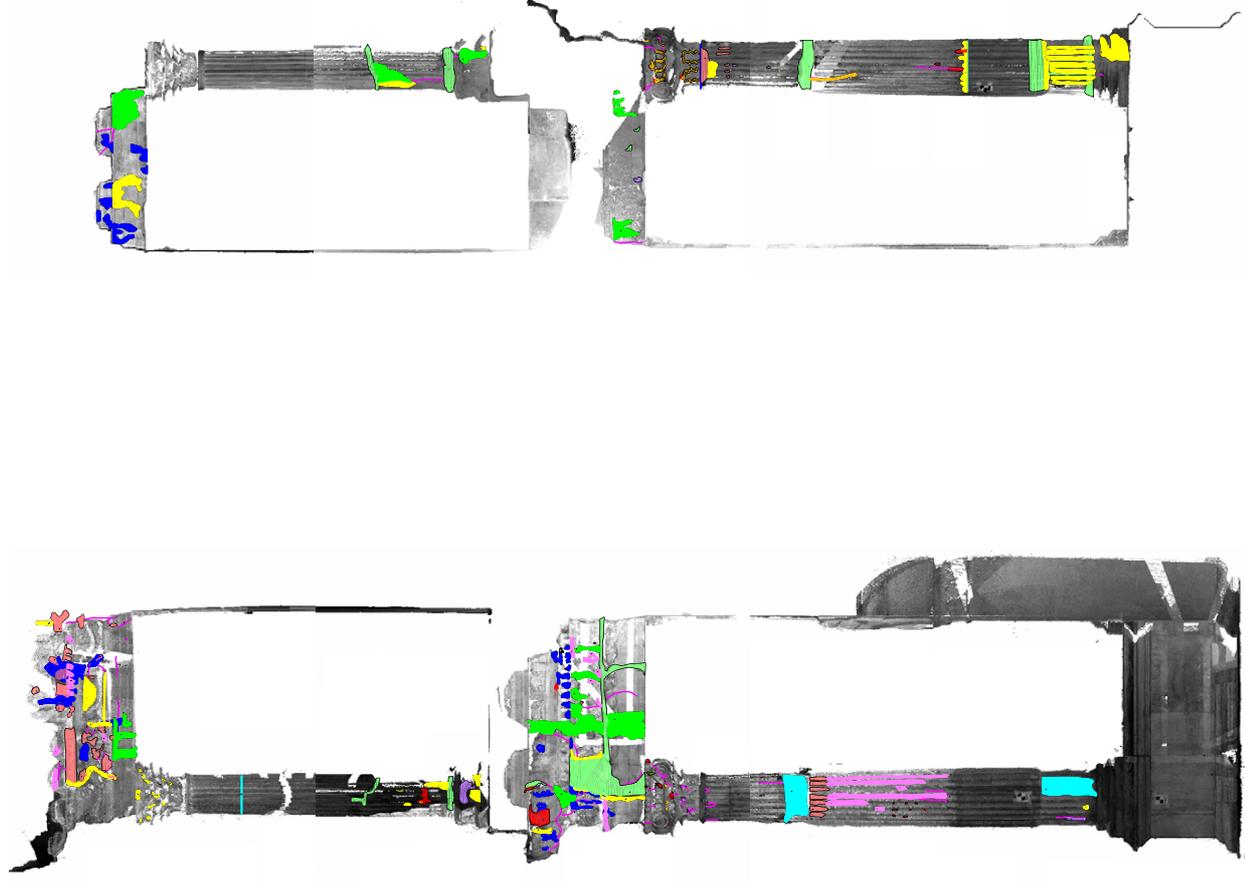
## Markt von Milet

Bestandsdokumentation

Darstellung	Schadenskartierung		
Phase	Bestand		
Maßstab	1:20	Ansicht	Decke
Datum	März 2003	Blattformat	A3
gezeichnet			
geprüft	Blatt-Nr. 5		

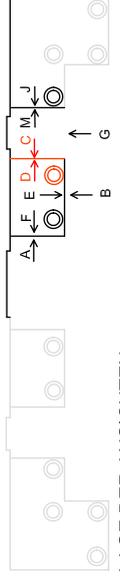
# Legende

-  Verschiebungen\_Konstruktion
-  Korrodierte\_Metallteile
-  Risse
-  Verschmutzung
-  Sinterschichten
-  Krusten
-  Moerfelschleier
-  Mehlender\_Marmor
-  Mineralische\_Klebung
-  Verfaerbung\_d\_metallische\_Loesungen
-  Ergaenzung\_beschaedigt\_Marmor
-  Gefuegeauflockerung\_schichtig
-  Schale\_Marmor
-  Abbroeckeln\_Zuckern



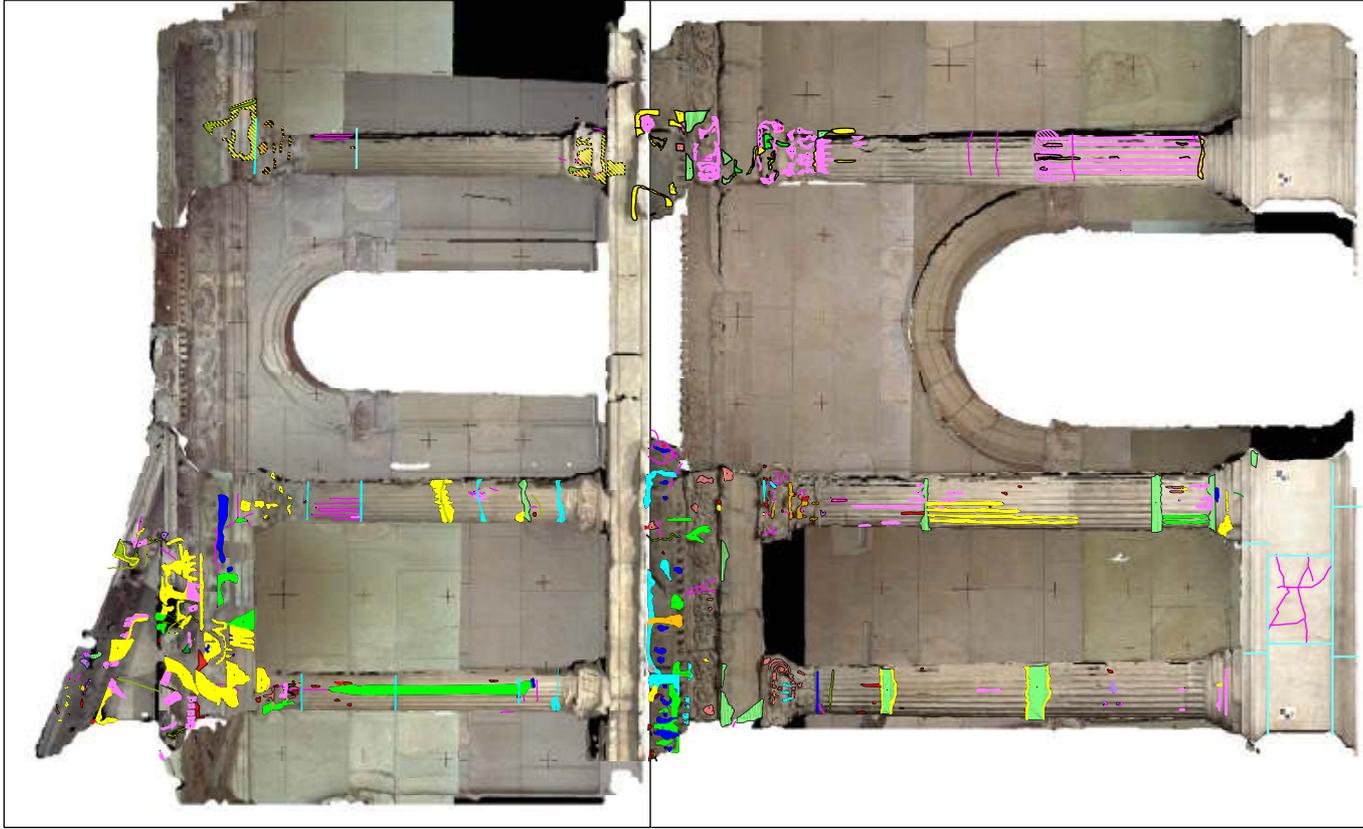
C

D



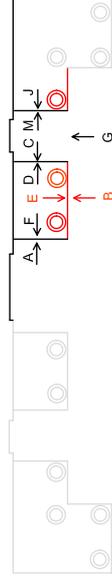
LAGE DER ANSICHTEN

<h2>Markttor von Milet</h2>	
Bestandsdokumentation	
Darstellung	Schadenskartierung
Phase	Bestand
Maßstab	1:20 Ansicht C,D
Datum	März 2003 Blattformat A3
gezeichnet	
geprüft	Blatt-Nr. 3



## Legende

- Verschiebungen\_Konstruktion
- Korrodierte\_Metallteile
- Risse
- Verschmutzung
- Sinterschichten
- Krusten
- Moeretschleier
- Mehlender\_Marmor
- Mineralische\_Klebung
- Verfaerbung\_d\_metallische\_Loesungen
- Ergaenzung\_beschaedigt\_Marmor
- Gefuegeauflockerung\_schichtig
- Schale\_Marmor
- Abbroeckeln\_Zuckern



LAGE DER ANSICHTEN

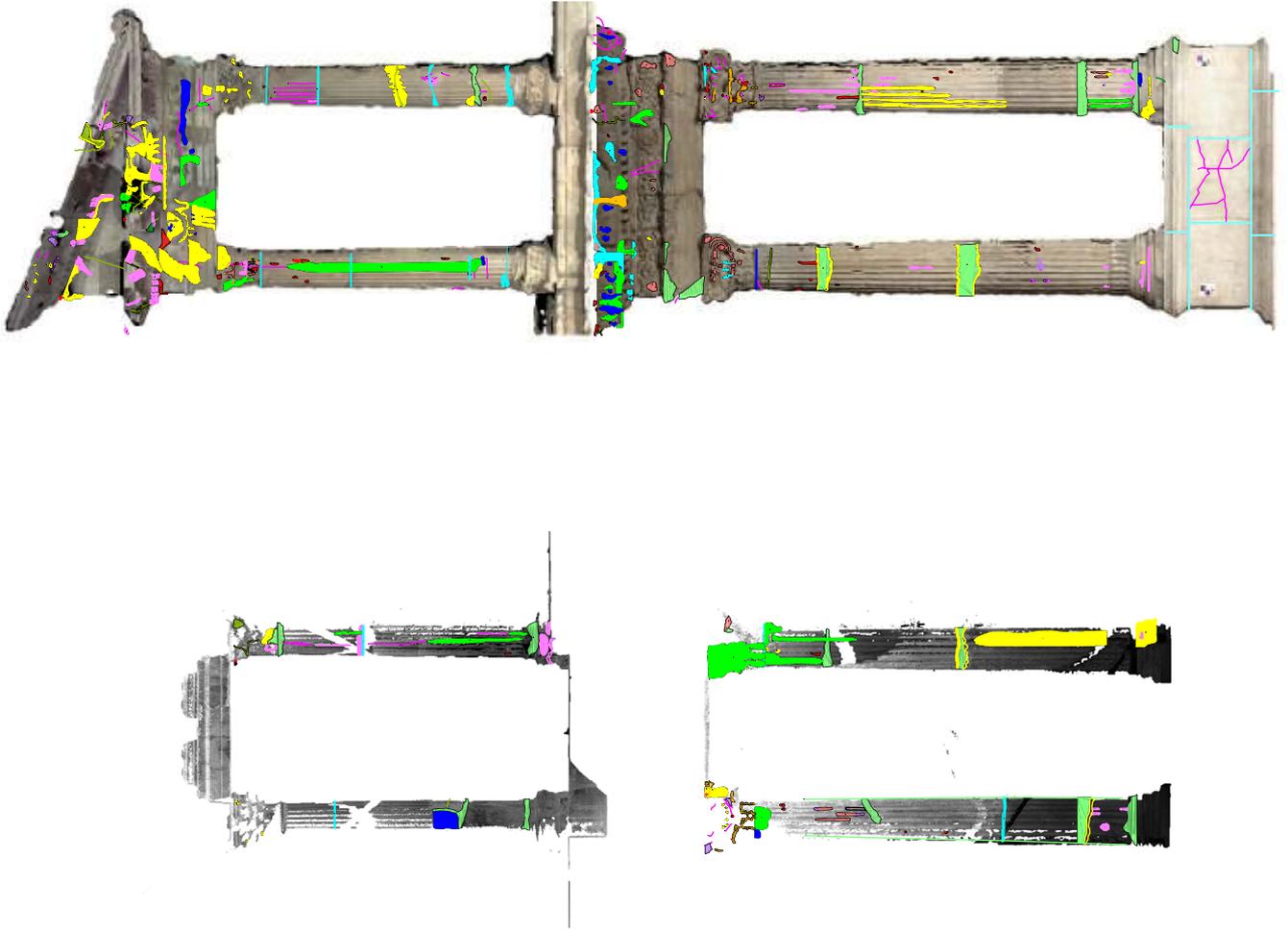
## Markttor von Milet

Bestandsdokumentation

Darstellung	Schadenskartierung		
Phase	Bestand		
Maßstab	1:20	Ansicht	E.B
Datum	März 2003	Blattformat	A3
gezeichnet			
geprüft			
		Blatt-Nr.	2

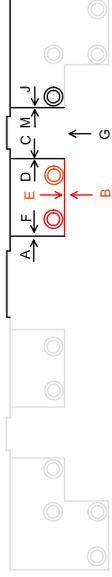
## Legende

-  Verschiebungen\_Konstruktion
-  Korrodierte\_Metallteile
-  Risse
-  Verschmutzung
-  Sinterschichten
-  Krusten
-  Moeretschleier
-  Mehlender\_Marmor
-  Mineralische\_Klebung
-  Verfaerbung\_d\_metallische\_Loesungen
-  Ergaenzung\_beschaedigt\_Marmor
-  Gefuegeauflockerung\_schichtig
-  Schale\_Marmor
-  Abbroeckeln\_Zuckern



E

B



LAGE DER ANSICHTEN

## Markttor von Milet

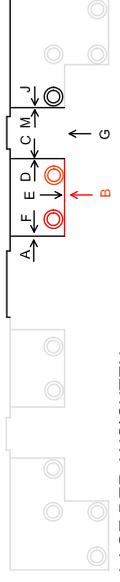
Bestandsdokumentation

Darstellung	Schadenskartierung		
Phase	Bestand		
Maßstab	1:20	Ansicht	E:B
Datum	März 2003	Blattformat	A3
gezeichnet			
geprüft			
		Blatt-Nr.	2



**Legende**

- Fehlstelle Bestand
- Marmor neu
- Gibsguss
- Marmor
- Marmor 20iger Jahre
- Marmor 50iger Jahre
- Originaloberfläche
- Fugenmörtel Reparatur
- Fugenmörtel 20iger Jahre
- Fehlende Fuge
- Beschädigte Fuge
- Geftissene Fuge



**Markttor von Milet**

Bestandsdokumentation

Darstellung	Schadenskartierung	
Phase	Bestand	
Maßstab	1:20	Ansicht B
Datum	März 2003	Blattformat A3
gezeichnet		Blatt-Nr.
geprüft		2



## Anlage 5

Verformungsmessungen am Markttor von Milet.

Prof. Dr. M. Schmidt und Dr. B. Middendorf,  
Fachbereich für Bauingenieurwesen der Universität  
Kassel.



## Verformungsmessungen am Markttor von Milet

Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt, Dr. rer. nat. B. Middendorf

Das in den zwanziger Jahren des 2. Jahrhunderts n. Chr. im kleinasiatischen Milet errichtete Markttor wurde 1903 wiederentdeckt. 1907-1908 wurden Teile der aufgehenden Säulenarchitektur nach der Fundteilung mit den türkischen Behörden nach Berlin gebracht, wo von 1925-1929 das Markttor im neuen Pergamonmuseum über dem nachgebauten Sockel wieder zusammengefügt wurde.

Da die Originalsubstanz nicht vollständig verfügbar war, sind Teile des Markttores mit zementgebundenen Baustoffen ergänzt worden. Im Markttor hat man eine versteckte Stahlkonstruktion integriert. Die beiden Zwischenebenen bestehen überwiegend aus Stahlbetonplatten, welche z.T. mit original Marmorteilen verkleidet sind. Die Säulen des Markttors bestehen größtenteils aus Marmor, sind aber auch mit Steinerfüllungsstoffen (SES) ergänzt worden. Die Säulen sind hohlgebohrt und mittig durch Stahlträger gestützt. Die Zwischenräume Marmor/SES-Zylinder – Stahlstütze sind mit Mörtel vergossen, um einen kraftschlüssigen Verbund zu gewährleisten.

Zerstörungen im Zweiten Weltkrieg und fehlerhafte provisorische Materialergänzungen haben zu Zweifeln an der Standfestigkeit und am dauerhaften Bestand des Markttores geführt. Im Rahmen eines DBU-Projekts unter Leitung von Prof. Siegesmund von der Universität Göttingen soll zum einen der bauliche Zustand des Markttores festgestellt werden. Zum anderen sollen kompatible Sanierungsbaustoffe entwickelt werden. Die Entwicklung von kompatiblen Vergussmörteln zur Instandsetzung der Säulen des Markttores wird am Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens der Universität Kassel durchgeführt.

Das Markttor weist deutliche strukturelle Schäden auf, die vermutlich auf Verformungen zurückzuführen sind, wie z. B. Risse in den Verbindungen Betonplatten/Marmorverkleidungen (Bild 1) sowie an den Säulenfüßen auf den Stahlbetonplatten (Bild 2) und möglicherweise durch außermittigen Druck hervorgerufene Abplatzungen an einigen Säulen (Bild 3). Um festzustellen, wie das Gebäude bei Temperaturänderung und unter Umständen bei anderen äußeren Verformungen reagiert, hat das Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens Verformungs- und Temperaturmessungen an vier ausgewählten, besonders betroffenen Stellen durchgeführt. Mit diesen Messungen sollte auch untersucht werden, ob das Markttor statisch stabil (standsicher) ist.



Bild 1: Durchlaufende Risse in Stahlbetonplatten und Marmorverkleidungen

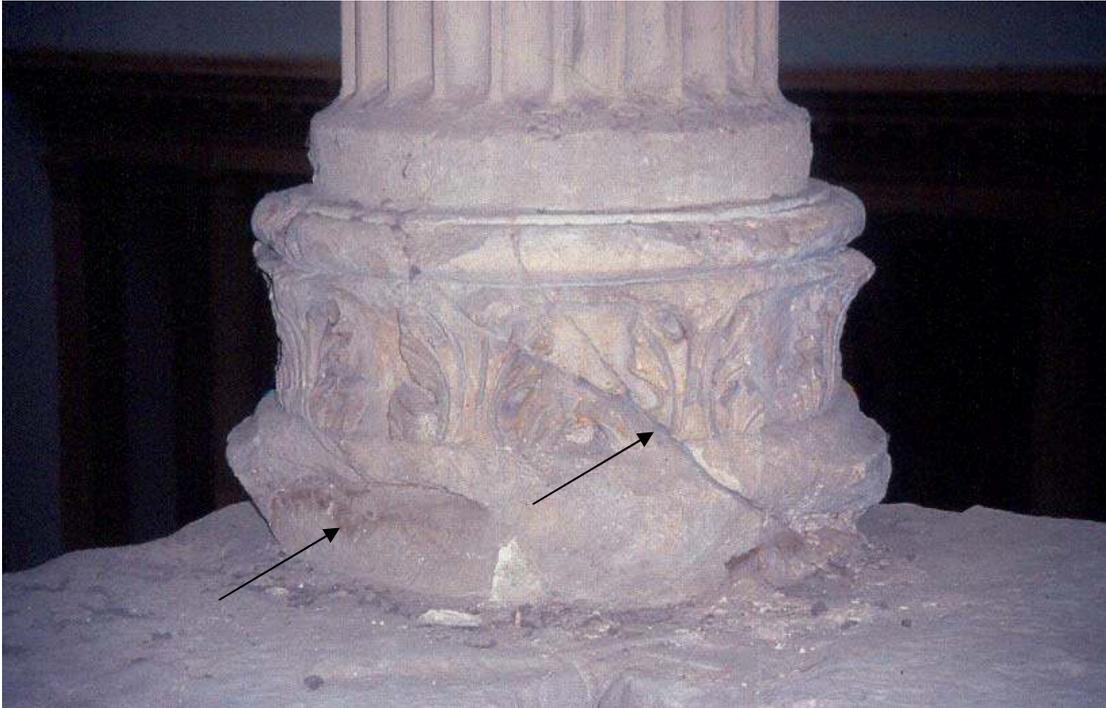


Bild 2: Risse und Abplatzungen an den Säulenfüßen



Bild 3: Druckinduzierte Abplatzungen (Pfeile) an den Marmorsäulen

Die Verformungsmessungen wurden mit induktiven Wegaufnehmern, Typ HBM W1T3, Messbereich  $\pm 1$  mm durchgeführt. Die Daten der induktiven Wegaufnehmer

wurden mit einem Messverstärker, Typ HBM Spider 8 aufgenommen und mit der Messdatensoftware, HBM Catman im PC weiterverarbeitet. Die Messbasis betrug 100 mm. Die Temperaturdaten sind mit Ni/CrNi-Thermoelementen aufgenommen worden, welche ebenfalls mit o. g. System ausgewertet worden sind.

Es wurden vier Wegaufnehmer und 2 Thermoelemente (Raum- und Objekttemperatur) am Markttor von Milet installiert. Bild 4 zeigt die Lokalitäten der Wegaufnehmer am Gebäude. Der Messaufbau ist aus Bild 5 zu entnehmen.

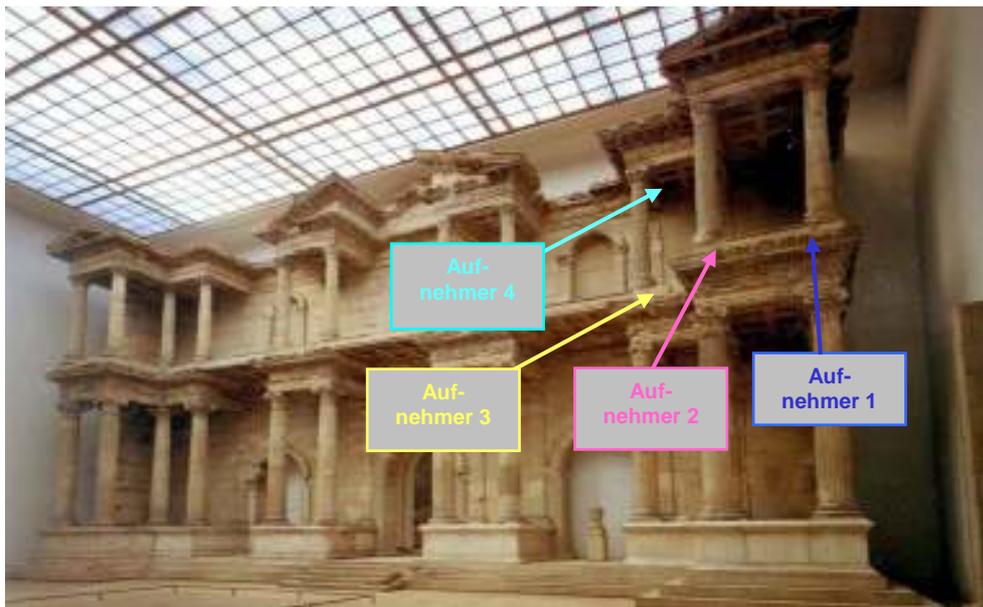


Bild 4: Lokalitäten der Wegaufnehmer über Rissen am Markttor von Milet



Bild 5: Messaufbau des Wegaufnehmers 1

Die Temperatur- und Verformungsmessungen wurden vom 16.04.02 bis zum 19.09.02 durchgeführt. Die Wegaufnehmer 3 und 4 wurden am 09.08.02 durch Fremdeinwirkung vom System entkoppelt, sodass nur bis zu diesem Zeitpunkt Messdaten vorliegen.

Diagramm 1 zeigt zusammenfassend die Ergebnisse der Temperatur- und Verformungsmessungen. Aus Diagramm 1 lässt sich ablesen, dass sich die Objekttemperatur mit der Raumtemperatur ändert. Aufgrund fehlender Klimatisierung des Museumsgebäudes ist die Raumtemperatur wiederum von der Außentemperatur und von der Nutzung (Anzahl der Besucher) abhängig (siehe auch Diagramm 2).

Die Ergebnisse der Verformungsmessungen über den Rissen lassen erkennen, dass zum einen die Maximalverformungen über den Rissen im Bereich von 0,21mm/m liegen und dass die Verformungen an den Stellen der Messaufnehmer 3 und 4 den Temperaturen folgen. Eine detaillierte Interpretation der Verformungsmessungen ist nur bei Kenntnis des statischen Gesamtsystems möglich.

Bei Betrachtung eines engeren Messzeitraums, hier 07.06. bis 17.06.02, lassen sich die tageszeitlich abhängigen Temperaturschwankungen erkennen. In Diagramm 2 ist dieser Messzeitraum grafisch dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, wie sich die Temperatur, sowohl Raum- als auch Objekttemperatur, über den Tagesverlauf erhöht und in den Nachtstunden absenkt. Die Objekttemperatur ist im Mittel 1,6°C geringer als die Raumtemperatur im Museumsgebäude. An den Rissen der Messstellen 3 und 4 ist eine scheinbare temperaturabhängige Verformung erkennbar. An den Rissen der Messstellen 1 und 2 ist die o.g. Temperaturabhängigkeit nicht so eindeutig.

Am 09.06.02 zwischen 9.30 und 11.00 Uhr führte eine Arbeitsgruppe der TU-Berlin Erschütterungsmessungen an einer Fußgängerüberführung am Gebäude des Pergamon Museums durch. Diese Erschütterungsmessungen führten, wie man Diagramm 2 entnehmen kann, zu keiner messbaren Verformung am Markttor, d.h., das Gebäude reagiert nicht auf dynamische äußere Beanspruchung, wobei Stärke, Dauer und Abstand nicht bekannt waren.

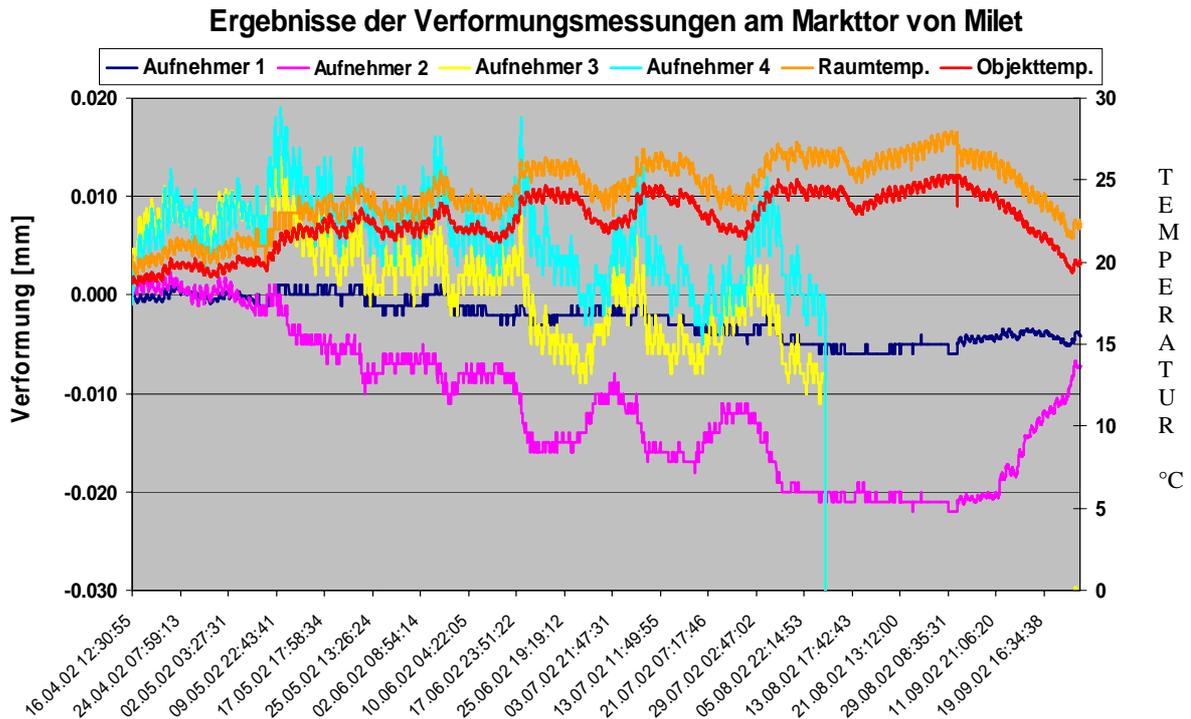


Diagramm 1: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Temperatur- und Verformungsmessungen

Um die Frage zu klären, ob es unter Berücksichtigung aller festgestellten systemverändernden Risse, Hohlräume und Abplatzungen zu weiteren Schädigungen des Markttores kommen kann und wie schnell eine substanzerhaltende Instandsetzung nötig ist und welche Verfahren dafür infrage kommen, muss das statische System im heutigen Zustand gerechnet werden.

Es ist nicht auszuschließen, dass die z. T. bis zu mehreren mm breiten Risse in den Brüstungen und in den Tragplatten sowie die exzentrischen Abplatzungen an einigen Säulenmänteln und –fußpunkten auf eine örtliche Überbeanspruchung zurückzuführen sind, die ihre Ursache in einer früheren oder noch anhaltenden Verformung des Bauwerks haben.

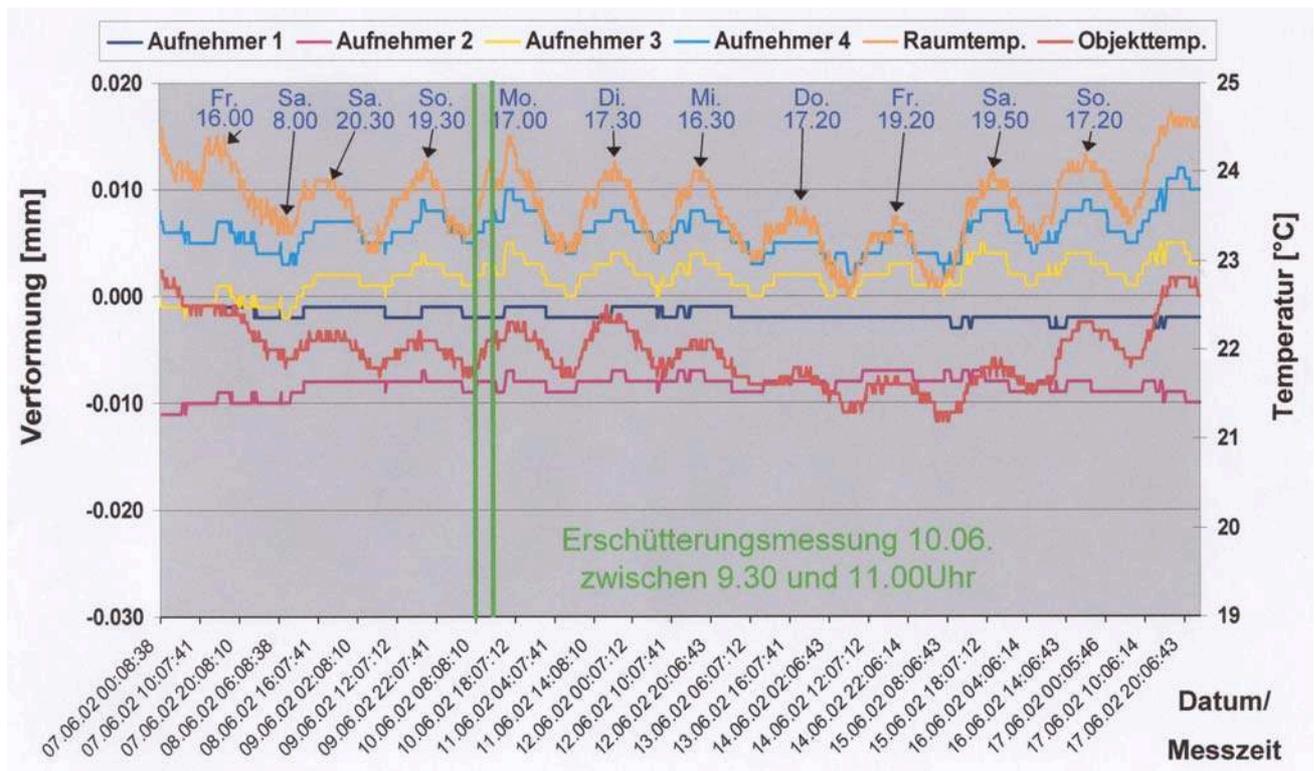


Diagramm 2: Zusammenfassende Darstellung der Ergebnisse der Temperatur- und Verformungsmessungen im Zeitraum 07.06. bis 17.06.2002

Ursache dafür können der Bombentreffer im 2. Weltkrieg sein. Es ist aber auch wahrscheinlich, dass sich die innenliegende, nach erstem Anschein biegeweiche Stahlkonstruktion durch Kriechen des Stahl verkürzt und verdreht hat. Dadurch werden die vertikalen Eigenlasten nicht mehr über das Skelett sondern u. U. ausmittig von den dünneren Marmorschalen der Säulen abgetragen, was die beobachtbaren schalenartigen Abplatzungen erklären würde. Dies würde auch die größeren Risse im Mittelbereich des Bauwerks erklären.



## Anlage 6

Das Markttor von Milet.

Siegesmund, S., Rüdrich, J. & Speiser, S, Restauero (im  
Druck).



# DAS MARKTTOR VON MILET

Siegfried Siegesmund, Jörg Rüdlich & Sebastian Speiser

## Einleitung

Der Wiederaufbau der Museumsinsel in Berlin ist angelaufen. Der schleichende Verfall und die fortschreitenden Schäden an diesen einzigartigen Kulturgütern haben trotz finanzieller Nöte zu einem raschen Beginn der Restaurierungsarbeiten geführt. Auch das Markttor von Milet im Pergamonmuseum erscheint in seinem baulichen Zustand, bedingt durch Zerstörungen, gewaltsame Eingriffe sowie fehlerhafte Ergänzungen, sehr zerbrechlich und ist in seinem Bestand gefährdet.

Im Zuge der o.g. Umbaumaßnahmen muss das Markttor von Milet zwecks Entlastung des Untergrundes vermutlich vollständig demontiert werden. Es ist dabei vollkommen ungewiss, wie alle Originalteile bei einem bevorstehenden Abbau entkernt werden können, ohne eine vollständige Materialzerstörung zu provozieren.

Um der komplexen Schadensvielfalt und der Knappheit öffentlicher Finanzressourcen Rechnung zu tragen, wurde unter Federführung von Prof. Dr. S. Siegesmund (GZG) ein interdisziplinäres Forschungsprojekt initiiert. Dieses im Vorfeld der nunmehr angelaufenen Rekonstruktionsarbeiten begonnene Projekt wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unterstützt. Vorrangiges Ziel des Forschungsprojektes ist die modellhafte Schadensanalyse des umweltgeschädigten Markttores von Milet. Der Modellcharakter erklärt sich aus der Tatsache, dass Objekte aus Naturstein mit diesen Dimensionen im musealen Innenraumbereich bisher in diesem Kontext noch nicht untersucht worden sind. Nur auf der Basis der beabsichtigten Untersuchungen und in Abstimmung mit den Schadensbildern sowie den mikroklimatischen Daten wird es möglich sein, nachhaltige Sanierungskonzepte zu erstellen.

Bei der Zusammenstellung des interdisziplinären Forschungsteams wurde neben fachlicher Kompetenz besonderes Augenmerk darauf gelegt, sowohl universitäre Arbeitsgruppen als auch frei marktwirtschaftlich agierende Firmen zusammenzubringen. Aus der Synthese von Forschung auf hohem Niveau und praktischer Implementierung durch Spezialisten vor Ort wird ein besonders kritischer Umgang und dadurch eine besondere Nachhaltigkeit der Erkenntnisse und Ergebnisse sichergestellt. Die gewonnenen Ergebnisse werden direkt der nunmehr mit der Restaurierung betrauten ARGE Pfanner (Berlin, München) zur Verfügung gestellt.

## Historisches und Baugeschichte

Das Markttor von Milet stellt ein nahezu einzigartiges archäologisches Baudenkmal nördlich der Alpen dar. Es handelt sich um eines der größten, zusammenhängenden Monumente, die im musealen Innenraum zu bewundern sind. Damit trägt das Markttor zu einem historisch

einmaligen Ensemble bei und hat seinerseits, wie auch der namensgebende Pergamonaltar oder das Wüstenschloss von Mschatta, die Architektur des Museums selbst beeinflusst.

Seit 1999 wurde das mit dem Markttor von Milet assoziierte Pergamonmuseum/Museumsinsel seitens des UNESCO – „World Heritage Funds“ in die Liste des besonders erhaltungswürdigen Weltkulturerbes aufgenommen. Die Architekturfragmente und Trümmer der zweistöckigen Markttorfassade wurden 1903 bei deutschen Grabungen in der Stadt Milet unter Leitung des Archäologen T. Wiegand geborgen und konnten nach Fundteilung mit den türkischen Behörden 1907-1908 nach Berlin überführt werden. In den Jahren 1925-1929 wurde das Tor bestehend aus insgesamt 750 t Marmorfragmenten nach Vorgaben des Architekten Hubert Knackfuß und unter Leitung des Archäologen Wilhelm von Massow im neuen, nach dem I. Weltkrieg eigens erweiterten Pergamonmuseum rekonstruiert und wieder aufgebaut (s. Abb. 1)(Strocka, 1981).

Baustiltechnisch vereint das von KNACKFUß (in: Strocka, 1981) um 120-160 n. u. Zt. datierte Tor zum einen Elemente der hellenistischen Bautradition, wie u.a. das griechische Säulenpropylon, mit der zeitgemäß römischen Bauweise (z.B. römische Bühnenfassade). Auf einem 28,92m breiten Unterbau erhebt sich mit zwei vorspringenden Seitenflügeln der symmetrisch gegliederte Sockel. Das in gleicher Art gegliederte Obergeschoß des Tores wird durch jeweils vorgelagerte, paarweise angeordnete Säulen getragen. Die Säulen werden von Kompositkapitellen bekrönt. Den Übergang vom Unter- zum Obergeschoß bilden neben dem Architrav, dem Rankenfries und dem Gesims eine durchgehende, freigespannte und reich gegliederte Kassettendecke. Das Tor erreicht seine maximale Höhe von 16,68m im Bereich des „gesprengten“ Mittelgiebels (Kästner & Weise, 1992).

## Restaurierungsgeschichte

Im Zuge der Aufbaumaßnahmen in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden aus statischen Gründen alle Säulenschäfte, Kapitelle und Gebälke bis auf eine geringmächtige Außenhaut ausgebohrt und im Inneren mit durchlaufenden Stahlstützen versehen (Abb. 2a und b), sowie mit Ersatzmaterialien ausgefüllt (Strocka, 1981). Die Kassettendecken sind zum Teil in eine durchgehende Stahlbetonkonstruktion eingehängt und zum größeren Teil komplett aus Beton ergänzt. Neben den Originalteilen aus Marmor wurden Baumaterialien wie Gips, mineralische Ergänzungs- und Fugenmörtel aber auch Ziegel (s. Abb. 3a) als Baumaterial verwendet.

Während des zweiten Weltkrieges wurde das Tor durch einen Luftminentreffer trotz Schutzmauerung schwer beschädigt. Die Explosion zerstörte das Dach und das Oberlicht über dem Markttor, ließ durch die Wucht den rechten Flügel des Tores überwiegend einstürzen und verursachte Brandschäden (s. Abb. 3b). Weitere Schäden entstanden durch umherfliegende Schrapnell und Splitter, die in Form von Abplatzungen und Einschlagkratern am gesamten Baukörper zu beobachten sind. Erst nachdem bereits ein Winter vergangen war, konnte das Tor durch ein Notdach vor der freien Bewitterung geschützt werden. Umfangreiche Restaurierungsmaßnahmen, die 1952-1954 unter archäologischer Leitung von H.H. Völker durchgeführt wurden, versetzten das Bauwerk in den heutigen Zustand. Auch

hier ist keine Dokumentation der Maßnahmen überliefert. Es können nach Aktenlage bisher keinerlei Aussagen über den Umfang, Art und die Qualität der Ausbesserungsarbeiten und der verarbeiteten Materialien gemacht werden.

In den letzten Jahren mussten vom Museumspersonal immer wieder spontan abgegangene Fragmente geborgen werden. Infolge dessen wurde zum Schutz von BesucherInnen ein Steinschlagnetz über die gesamte Front des Tores angebracht.

## SCHADENSKARTIERUNG

Für die eigentliche Schadenskartierung, ausgeführt von der Restauratorengemeinschaft *Speiser & Endemann (Berlin und Bamberg)*, wurde eine repräsentative Kartierachse ausgewählt. Die Kartierung erfolgte auf einer mittels Rotationslaser erstellten, digitalen Kartengrundlage der Fa. Octocom (Berlin-Birkenwerder). Die Kartierachse sollte zum einen exemplarisch alle das Objekt baustiltechnisch charakterisierenden Architekturelemente erfassen. Zum anderen sollte der komplette Materialbestand sowie das gesamte am Tor auftretende Schadensinventar vorliegen. Die letztendlich definierte Musterachse liegt darüber hinaus zusätzlich im Schnittstellenbereich einer durch die Bombentreffer stark geschädigten Zone und einem wenig geschädigten Bereich. Diese Normierung auf „Kriegsschäden“ bzw. „Nicht-Kriegsschäden“ sollte Aufschluss darüber geben, inwiefern Alterationen durch Umweltbedingungen (Innenraum, Besuchsaufkommen, Materialunverträglichkeiten) oder durch (in-) direkte Einwirkungen des Bombentreffers verursacht wurden. Auch wäre eine Triggerung im Sinne von neugeschaffenen Wegsamkeiten über die schockartige Ausbildung von Rissen und Rissystemen in Folge des Impaktes mit anschließender Bewetterung denkbar.

Zunächst wurde ein Schadensglossar über sämtliche am Tor auftretenden Baumaterialien und Schadensphänomene aufgenommen und in einer Datenbank für alle weiteren Projektschritte archiviert. Folgende Schäden wurden unterschieden: Risse und Rissysteme, Metallkorrosionen, konstruktionsbedingte Schäden, Verschmutzungen, Sinterschichten, Krusten, Mörtelschleier, Marmorabzuckerungen, mineralische Klebungen, Verfärbungen, defekte Fugen, Schalenbildungen, Gefügeflockerungen etc. (Abb. 4). Die wichtigste Beobachtung der Materialverteilungskartierung ist, dass auf Oberflächen des Originalmarmors unterschieden werden kann zwischen solchen mit antiken Oberflächenbearbeitungen und Varietäten, wo diese z.T. völlig fehlen, d.h. von der Antike bis in die Gegenwart massive Oberflächenverluste aufgetreten sind. Auch wenn weite Bereiche des Markttores noch aus Originalmarmor bestehen, weist eben nur noch ein wesentlich geringerer Teil Originaloberflächen auf.

Die nach Aktenlage wichtigsten Aufbau- und Restaurierungsphasen des Markttores aus der Berliner Zeit werden durch die Ergebnisse der Materialkartierung detailliert aufgelöst und deutlicher rekonstruierbar. So konnte der ersten Aufbauphase in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts ein qualitativ hochwertiger Restauriermörtel zugeordnet werden. Er besteht

makroskopisch aus u.a. einem weiß-milchigen, kristallinen Zuschlag, bei dem es sich eventuell um Marmormehl handeln könnte. Sollte sich diese Vermutung bestätigen, so liegt der Verdacht nahe, dass das Marmormehl bei den Ausbohrarbeiten anfiel und gleich weiterverarbeitet wurde. Da dieser Restauriermörtel vergleichsweise geringe Schädigungen aufweist, scheint die Ermittlung seiner gesteintechnischen Kennwerte vor dem Hintergrund späterer Restaurierungsmaßnahmen dringlich. In diesen Zeitraum kam ein ebenfalls qualitativ guter Kalkfugenmörtel zum Einsatz. Weiterhin wurden einige am Tor fehlende Kapitelle komplett durch, sich am Original orientierende Gipsabgüsse ergänzt. Der Nachkriegszeit wurden in deutlicher Abgrenzung zu o.g. Materialien im Fugen- und Restauriermörtelbereich im Verhältnis qualitativ primitive Zementmörtel zugeordnet. Auch die schlechte Ausführung der Antragungen unterscheidet sich im Vergleich zu denen der früheren Restaurierungsphase deutlich. So wurde beispielsweise weitflächig in die angrenzenden Originalflächen Zementmörtel angetragen. Über eine detaillierte Mörtelanalyse und die problemangepasste Entwicklung von Ersatzmörteln wird in einer weiteren Arbeit berichtet.

In mehreren Bereichen des Marktttores, vor allem unterhalb des oberen Gurtgesimses und im Bereich der oberen Kapitelle und Säulen zeigen sich tuffartige Sinterablagerungen. Die Sinterschichten sind auf die verwitterte Steinoberfläche angewachsen. Auffallend ist, dass die Sinterschichten fahnenartig unterhalb feiner Haarrisse auftreten. Aufgrund der Ausprägung und Morphologie der Ablagerungen kann davon ausgegangen werden, dass es sich um Auswaschungen von Bindemitteln handelt. Die Sinterbildungen weisen auf die erhöhte Feuchteeinwirkung hin, die vermutlich auch die Korrosionen der Bewehrungen verursachte.

Das Markttor weist deutliche strukturelle Schäden auf, die vermutlich auf Verformungen zurückzuführen sind, wie z.B. Risse in den Verbindungen Betonplatten/Marmorverkleidungen (Abb.?) sowie an den Säulenfüßen auf den Stahlbetonplatten (Abb. 5) und möglicherweise durch außermittigen Druck hervorgerufene Abplatzungen an einigen Säulen (Abb. 5). Verformungsmessungen über die Risse in einem Zeitraum von 6 Monaten durch die Arbeitsgruppe der Universität Kassel (*Schmidt & Middendorf*) lassen erkennen, dass die Maximalverformungen über den Rissen im Bereich von 0,21mm/m liegen. Bei einem direkten Vergleich von Objekt- und Raumtemperatur als auch den Verformungsmessungen zeigt sich, dass an den Rissen eine temperaturabhängige Verformung erkennbar ist. Erschütterungsmessungen an einer Fußgängerüberführung am Gebäude des Pergamonmuseums führten zu keiner messbaren Verformung am Markttor.

Wie in Abb. 5 eindrucksvoll zu beobachten ist, treten an statisch brisanten Stellen wie z.B. an den in die Rückwand greifenden Gebälken massive, umlaufende bis zu mehreren Zentimetern mächtige Risse auf. Flächig nach unten orientierte Mörtelschleier sind an Rissysteme v.a. im Gebälk und an die Säulen gekoppelt. Durch Dübel und mineralische Mörtel fixierte Originalmarmorbruchstücke werden z.T. nur noch durch Verspannung gehalten. Starke Gefügeschäden treten an den reich verzierten Ornamenten des Gebälkes, den Kapitellen sowie an den Kannelurenstegen der Säulen auf (Abb. 5). Hier tritt ein Massenverlust durch

„Abzuckern“ der oberen Kornlagen auf. Am gesamten Markttor sind rostende Eisenteile zu beobachten, welche bereits Schäden wie Rostsprengung und Verfärbung durch Rostläufer verursacht haben (Abb. 5).

Krusten- und Patinabildungen oder andere potentielle Schadwirkungen gehen auch von Organismen aus, die anorganische oder organische Säuren produzieren (Abb. 5). Diese Untersuchungen wurden von *Hoppert* (Universität Göttingen) durchgeführt. Während der Anteil der bakteriellen koloniebildenden Einheiten (CFU) in der Raumluft nur 3-4% betrug, wurden in Abdrücken von der Oberfläche des Gesteinsmaterials ca. 40% pilzliche CFU gefunden, außer auf stark staubbelasteten Oberflächen, wo der Anteil pilzlicher CFU bei ca. 20% lag. Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich unter der kontrollierten Atmosphäre eines Innenraumes Biofilme sehr langsam entwickeln, solange die Oberflächen nicht durchfeuchtet sind. Im Falle des Markttors von Milet wird die Gesteinsoberfläche des Bauwerkes durch den Film in zweifacher Hinsicht beeinträchtigt: a) Pigmentierung der Oberfläche und b) Herauslösen oberflächenparalleler Partikel. Der Umfang der Schadwirkungen betrifft nur die Oberfläche bis in eine Tiefe von maximal 100µm.

Es ist zum jetzigen Projektstand wie exemplarisch geschildert eine deutliche Schadenskonzentration an signifikanten Stellen zu beobachten. Die Schadenskartierung gibt eine räumliche Verbreitung der in der Musterfläche vorkommenden Phänomene wieder. Antike Marmore, Mörtel, Marmorimitate, Gipsabgüsse, Marmorplatten, Zementabgüsse, Eisenarmierungen, Eisenanker und Stahlklammern konnten den jeweiligen Aufbau- und Restaurierungsphasen zugeordnet werden. Besonders auffällig ist, dass der mehrschichtige Marmorimitatmörtel der 20er Jahre über deutlich weniger Schäden wie Abplatzungen, Schalenbildungen und Ausbrüche verfügt. Dies steht im Gegensatz zu den Restaurierungsphasen der 50er Jahre. Zukünftige Arbeiten werden die gewonnenen Erkenntnisse über die gesamte Fläche des Objektes ausdehnen müssen. Es ist jedoch zu diesem Zeitpunkt schon deutlich geworden, dass das Markttor von Milet ein massives, multiples Schadensbild aufweist, welches einen zügigen Handlungsbedarf erforderlich macht.

## DER MARMOR

Für eine objektangepasste Sanierung der Marmore ist die Kenntnis des Erhaltungszustandes aber auch der mineralogischen Zusammensetzung und der Gefügeausprägung von entscheidender Bedeutung. Da bekannt war, dass unterschiedliche Marmore am Markttor verbaut sind, stellte sich die Frage, wie viele unterschiedliche Typen Verwendung fanden und wie sich ihre Verteilung am Objekt darstellt. Zu diesem Zweck wurde eine Kartierungskampagne durchgeführt. Mittels gefügekundlicher Untersuchungsmethoden wurden zunächst im Keller des Pergamon Museums gelagerte Reststücke und Säulenbohrkerne analysiert. Auf der Basis der so gewonnenen Erkenntnisse erfolgte eine grundlegende Untergliederung der Marmortypen. Anhand der makroskopischen Beobachtungen wie Foliation, Riss- und Mineralisationsgefüge sowie Korngrößen konnten

zwei grundlegend unterschiedliche Marmortypen gegeneinander abgegrenzt werden. Hierbei handelt es sich um einen vorwiegend undifferenzierten und einen unregelmäßig gebänderten Marmor. Für die Verteilung der beiden charakterisierten Marmortypen ist keine generelle Anordnung am Bauwerk zu erkennen, die auf eine stilistische Verwendung, auf Bauabschnitte des Gebäudes oder auf eine variierende Verfügbarkeiten der unterschiedlichen Marmore aufgrund von Abbauphasen im Steinbruch zurückzuführen ist (s. Abb. 6). Es können jedoch folgende Auffälligkeiten festgestellt werden:

- gewisse Anordnung der Marmortypen im Giebelbereichen
- Säulenschäfte der oberen Ordnung werden generell vom vorwiegend undifferenzierten Marmortyp gebildet
- Säulenkapitelle werden generell vom vorwiegend undifferenzierten Marmortyp gebildet
- Säulenbasen werden generell vom vorwiegend undifferenzierten Marmortyp gebildet

Hingegen weisen die Säulenschäfte der unteren Ordnung eine sehr heterogene Verteilung der Marmortypen auf. Dies gilt ebenfalls für den Architrav und die Friese, wobei hier der vorwiegend undifferenzierte Marmortyp dominiert. Die Dominanz des vorwiegend undifferenzierten Marmortyps kann für das gesamte Markttor von Milet festgestellt werden.

## DAS MAKROGEFÜGE

Der vorwiegend undifferenzierte Marmor weist eine grauweiße Farbe auf. Am Objekt ist diese aufgrund einer stark ausgebildeten Patina bzw. eines Schmutzbelages nur selten zu erkennen. Vereinzelt zeigt dieser Marmortyp dunkelgraue Bänder, welche isoliert vorkommen und die Foliation nachzeichnen (s. Abb. 7a). Die Bänder verlaufen generell geradlinig und sind streng begrenzt. Sie erreichen Mächtigkeiten von zumeist 3 cm. Die makroskopisch zu eruiende mittlere Korngröße befindet sich vorwiegend im Bereich zwischen 1,0 mm bis 1,5 mm, womit dieser Marmor als mittelkörnig zu beschreiben ist. Zusätzlich können verschiedene, nur lokal verbreitete Gefügemerkmale einer postmetamorphen Überprägung beobachtet werden.

Weitaus häufigstes Merkmal sind dabei mineralisierte Risse, welche durch feinstkörnige hellrote Mineralisate verfüllt sind. Die Rissweiten liegen im Bereich von einigen Millimetern. Die Häufigkeit der Risse und ihre räumliche Lage sind insbesondere für die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Gesteins von großer Bedeutsamkeit. Dies beruht darauf, dass auch mineralisierte Risse Schwachstellen im Gestein darstellen, die bei Beanspruchung bevorzugt aktiviert werden können. Neben den Rissen können auch mineralisierte Nester beobachtet werden, die zumeist taschenförmige Geometrie besitzen und scharfe Begrenzungen zum umgebenden Marmor aufweisen. Sie zeigen, mit feinstkörnigen rötlichen Verwachsungen, die gleichen Mineralfüllungen wie die mineralisierten Risse. Die Ausdehnung der Mineralnester befindet sich im Zentimeter- bis Dezimeter-Bereich.

Der unregelmäßig gebänderte Marmor repräsentiert ein stark strukturiertes Gestein und ist durch einen ausgeprägten Lagenbau gekennzeichnet (s. Abb. 7b). Der Marmor weist makroskopisch ein weißes bis weißgraues Erscheinungsbild auf. Wesentliches Gefügemerkmal ist eine deutliche Bänderung (Lager), welche die Foliation nachzeichnet. Hierbei können zwei unterschiedliche Arten von Materialwechselln beobachtet werden. Zum einen handelt es sich um schwach gelblich bis leicht rötliche, zum anderen um hellgraue bis graue Lagen. Zwischen diesen Bändern zeigt der Marmor zumeist eine weiße Erscheinung. Die mittlere Korngröße ist nach makroskopischen Beobachtungen auf ca. 0,5 mm einzuschätzen. Somit ist der Marmor als feinkörnig zu bezeichnen.

Die schwach gelblichen bis leicht rötlichen Bänder besitzen eine Mächtigkeit vorwiegend im Bereich einiger Millimeter. Ihre Anordnung kann sowohl relativ streng parallel aber auch sehr unregelmäßig ausgebildet sein. Die Abstände untereinander befinden sich im Bereich einiger Zentimeter. Aufgrund von Erfahrungswerten ist anzunehmen, dass es sich hierbei um feinstkörnige Verwachsung von Dolomit und Calcit handelt. Darauf weist auch eine heterogene Rückwitterung des Marmors hin. Die schwach gelblich bis leicht rötlichen Bänder sind dabei durch eine wesentlich höhere Verwitterungsresistenz gegenüber den Hauptbereichen des Marmors gekennzeichnet und bilden ein positives Relief.

Für die hellgrauen bis grauen Bänder ist eine unregelmäßige Begrenzung zum umgebenden Gestein zu beobachten. Sie verlaufen mehr oder weniger parallel zu den schwach gelblichen Bändern. Die grauen Lagen erreichen Mächtigkeiten bis zu einigen Zentimetern. Der Materialwechsel ist hier vermutlich auf feinverteilten Graphit oder auch Pyrit im Gestein zurückzuführen. Die Rückwitterungsrate ist gleich derjenigen der Hauptbereiche des Marmors.

## MULTISPEKTRAL-ANALYSEN

Zur Material- und Schadensbestandsaufnahme wurden von *Hornschuch & Hecke*s (Bergbaumuseum Bochum) Multispektral-Analysen an einer ausgewählten Kartierachse durchgeführt. Multispektrale Aufnahmen registrieren die vom Objekt reflektierte Strahlung in verschiedenen voneinander getrennten Spektralbereichen. Schadenstypen wie Mörtelschleier, Roststellen oder auch die Klassifizierung der Marmortypen standen bei diesen Untersuchungen im Vordergrund. Pseudofarbbilder, Quotientenbilder und künstlich erzeugte Bilder mittels Kanaldivision erlaubten eine gute Isolierung einzelner Schadenstypen. Die Verteilung der am Markt verwendeten Marmortypen stellte sich als eher problematisch dar. Durch den Ansatz einer wissenschaftlichen Klassifizierung, die hier eine direkte Koordination mit den Restauratoren verlangte, konnten jedoch „Trends“ herausgearbeitet werden. Ein Beispiel einer solchen Differenzierung ist in Abb. 8 zu sehen. Die erarbeiteten Beispiele haben gezeigt, dass neben der objektiven und langzeitstabilen Farb-Abbildung des Markttors die Multispektralbilder und ihre Auswertung einen Beitrag zur Befunderhebung leisten. Das Oberflächenrelief, die Oberflächenrauigkeit und die Patina beeinflussen das spektrale Reflexionsverhalten, sodass eine strenge Isolierung durch einen pixelbasierten Klassifizierungsansatz nur bedingt möglich ist.

## ZERSTÖRUNGSFREIE ANAMNESE DES INTERNAUFBAUES DER ARCHITEKTURTEILE

Zerstörungsfreie Prüfungen des Verwitterungszustandes der einzelnen Bauteile zur Ermittlung von nachhaltig wirksamen Konservierungsstrategien für nicht-tragende und Restaurierungs- bzw. Konsolidierungsstrategien tragender Bauteile gehörten ebenfalls zum Arbeitsprogramm. Hierzu kamen die Ultraschalltomographie, Georadar und die Tomographie des spezifischen elektrischen Widerstandes zur Ermittlung des Internaufbaues von Trommelsäulen zum Einsatz. Zwar ist der generelle Aufbau der Säulen, mit einem zentralem Stahlgerüst und einer Ausfüllung der Hohlräume mit Beton, Ziegel sowie Kalkmörtel bekannt (vgl. Abb. 3), die Anordnung und genaue Lage der verschiedenen Materialien innerhalb der jeweiligen Säule ist jedoch weitgehend unklar. Die zerstörungsfreien Untersuchungen werden von der Universität Göttingen gemeinsam mit der Arbeitsgruppe *Yaramanci & Hettrich* (TU Berlin) und *Jakobs & Just* (Universität Leipzig) durchgeführt. Die eigentlichen Verfahren können im Rahmen dieses Aufsatzes nicht im Einzelnen erläutert werden und sollen für alle drei Verfahren im Folgendem nur exemplarisch diskutiert.

Ultraschallgeschwindigkeiten werden seit längerem zur Diagnose von Erhaltungszuständen eingesetzt, da diese sehr sensitiv auf verwitterungsbedingte Änderungen reagieren. In Abb. 9 ist die Geschwindigkeitsverteilung für eine Trommelsäule angegeben. Diese zeigt eine mehr oder weniger konzentrische Verteilung mit Geschwindigkeiten von 5,2km/s am Rand und wesentlich geringeren Geschwindigkeiten von 4,2km/s im zentralen Bereich. Es zeigt sich hier sehr deutlich, dass die hohen Geschwindigkeiten am äußeren Rand dem Marmor zugerechnet werden müssen. Ein nicht verwitterter Marmor hat Geschwindigkeiten von ungefähr 5,5km/s bis 6,5km/s. Diese Interpretation korreliert sehr gut mit Geschwindigkeiten, die an Vergleichsproben im Labor ermittelt wurden und ungefähr 5,0km/s ergaben. Für Mörtel können Geschwindigkeiten von 3,0km/s bis 4,5km/s angenommen werden. Dies bestätigte sich durch Messungen an Mörtelvergleichsproben. Ziegel geben geringere Werte und sollten ungefähr den Bereich von 1,5km/s bis 3,5km/s umfassen. Stahl dagegen wird ungefähr Werte um 6,0km/s aufweisen. Die relativ geringeren Geschwindigkeiten im zentralen Bereich der Säulen stellen somit eine gemittelte Geschwindigkeit aus dem Füllmaterial der hohlgebohrten Säulen dar. Die eher höheren Geschwindigkeiten des Stahles können im Tomogramm (Abb. 9) nicht weiter aufgelöst werden.

Die Widerstandsmessungen wurden an zwei Segmenten der Säule durchgeführt, deren unteres Segment außen aus Originalmarmor besteht, während das obere Segment komplett aus Ersatzmaterial ist (Abb. 10). Die ermittelten Widerstandsmessungen der beiden Segmente unterscheiden sich signifikant. Während in der unteren Ebene sehr hohe spezifische elektrische Widerstände  $10^8$  bis  $10^{10} \Omega\text{m}$  (Marmor, Hohlräume) auftreten, liegen die Werte oben maximal bei  $10^6$  bis  $10^7 \Omega\text{m}$  (trockner Beton). Im unteren Tomogramm erkennt man ein deutliches Widerstandsminimum ( $<10^4$ ) im Zentrum, welches dem Stahlträger zugeordnet werden kann. Das obere Tomogramm weist eine kreisförmige Bewehrung des Betonsegmentes auf.

Georadarmessungen ermöglichen die Erkundung der Materialbeschaffenheit, des Aufbaus z.B. der Säulen sowie unterschädlicher Schädigungen wie feuchte Bereiche oder Klüfte. Diese Messungen wurden ebenfalls an den bereits oben genannten Säulenebenen durchgeführt. In den Radargrammen zeigen sich ganz deutliche Unterschiede (Abb. 11). Die aufgezeichneten

Signale der direkten Welle weisen klare Unterschiede im Marmor und im Ersatzmörtel auf. Hyperbelartige Strukturen können mit Verankerungen, die bis nahe an die Oberfläche reichen korreliert werden. Des Weiteren werden die Stahlträger durch Reflexionen im Radargramm sichtbar. Diese Unterschiede sind ebenfalls gut dokumentiert im oberen Segment. Hier zeigen sich einheitliche Wellenzüge, da der gesamte Mörtel aus einem homogenen Material besteht. Der Stahlträger scheint nicht ganz mittig zentriert zu sein. Die einzelnen Beobachtungen konnten durch entnommene Bohrkerns verifiziert werden. Außerdem haben inzwischen aufgefundene Akten (frdl. Mitteilung von Dr. Pfanner), die hier zerstörungsfrei abgeleiteten Beobachtungen bestätigt.

## DAS KLIMA

Die Verwitterung von Baumaterialien wird zu einem großen Teil durch die Umweltbedingungen denen sie ausgesetzt sind gesteuert. Viele der beobachteten Schäden am Markttor sind zumindest mittelbar an Klima-Variationen (Temperatur, relative Feuchte, Taupunktunterschreitungen etc.) gekoppelt. Es muss demnach untersucht werden, ob und inwieweit die derzeitigen Innenraum-Umweltbedingungen die fortschreitende Degradation des Objektes begünstigen. Nicht unerheblich ist der möglicherweise anthropogene Belastungspfad, der vor dem Hintergrund von durchschnittlich 6000 (!) Besucher /-innen am Tag (mit Spitzenwerten die um 20000 Personen/Tag) erheblich die Komposition der Innenraumatmosfera beeinflussen dürfte.

Um einen Eindruck über die gesamte mikrobielle Belastung der Raumluft im unmittelbaren Umfeld des Markttores zu gewinnen, wurden von *Hoppert* (Mikrobiologie der Universität Göttingen) Keimzahlen in der Raumluft und auf der Objekt Oberfläche bestimmt. Die Zahl der bakteriellen koloniebildenden Einheiten variiert zwischen 700 (in 3 und 1,5m Höhe) und 2800 (in 30cm Höhe) pro m<sup>3</sup> Raumluft. Damit liegt der Anteil bakterieller Organismen etwa 5-fach höher als für vergleichbare Gebäude. Der hohe Anteil bakterieller Organismen in der Raumluft lässt allerdings auf eine Situation schließen, in der sich gerade Bakterien (gegenüber Pilzen) leicht vermehren, z.B. eine durch Klimatisierung, viel Publikumsverkehr oder äußere Witterungsbedingungen bedingte hohe Luftfeuchtigkeit. Da Luftkeime und Sporen in der Regel an (größere) Staubpartikel adsorbiert sind, ist die Keimzahl auch immer ein direkter Ausdruck für die Gesamtlast an Aerosolen in der Raumluft.

Zu der Wechselwirkung Besucher/-innen versus Ausstellungsobjekt gibt es in der einschlägigen Literatur noch keine ausreichenden Daten. Ein weiterer Faktor, der die besondere klimatische Situation im Innenraumbereich kontrolliert, sind die in den Museumswänden des Pergamonmuseums integrierten, defekten Belüftungskanäle, die durch Schuttreste aus dem 2. Weltkrieg verfüllt sind. Ihre Funktionsfähigkeit dürfte folglich stark herabgesetzt oder inaktiv sein. Zudem ist das ehemals weiß getünchte Glasdach mit der Zeit verdunkelt und führt so zu einer zusätzlichen Aufheizung bei direkter Sonnenbestrahlung. Aus verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen ist bekannt, dass gerade der Marmor sehr sensitiv auf höhere Temperaturen und Feuchtevariationen reagiert (s. Naturstein 5/2001). Da im Pergamonmuseum bisher keine längerfristigen, detaillierten Innenraum-Klimadaten erhoben wurden, besteht vor dem Hintergrund der Beurteilung von wirksamen Kapillarkräften

und Mobilisation etwaiger im Mauerwerk enthaltener Salze starker Handlungsbedarf. Zudem bildet dieser Datenpool die Basiskennndaten für Materialverträglichkeitsprüfungen. Damit Klimamessungen überhaupt einen reproduzierbaren Aussagewert besitzen, muss die Dauer der Messungen alle zu erwartenden, extremen Klimazustände, wie Jahreszeiten, SpitzenbesucherInnenströme etc. umfassen. Um die Auswirkungen des Innenraumklimas auf den Objektkörper möglichst hochauflösend beobachten zu können, wurden Messfühler jeweils direkt am Objekt, unter der Decke des Museumsdaches, am Boden und im Bereich des größten Luftzuges angebracht. Zu Vergleichszwecken wurden die Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe der Außenluft gemessen, um die Kopplung des Innenklimas mit dem Außenklima beurteilen zu können (Abb. 12). Die Messungen fanden im Zeitraum vom 11.04.2002 bis zum 20.11.2003 statt.

Zur Darstellung eines Jahresklimazyklus wurden die erfassten 15-Minuten-Werte reduziert, indem 60-Minuten-Minima und -Maxima sowie Standardabweichungen berechnet wurden. Für die im Museum gemessenen Raumtemperaturen bestehen jahreszeitliche Temperaturschwankungen von insgesamt ca. 10°C, wobei Spitzenwerte von max. 30°C (Sommer) registriert wurden. In Abb. 12 ist zu erkennen, dass die Innentemperatur des Museums hauptsächlich von der Außentemperatur abhängig ist. Teilweise reagiert die Innentemperatur etwas zeitverzögert (wenige Tage) zu der Außentemperatur. Die Besucher scheinen keinen oder wenig Einfluss auf die Temperatur im Museum zu haben. Um dieses genauer zu überprüfen, wurden die Innentemperaturen gegen die Außentemperaturen von 10-18Uhr (Öffnungszeit) jeweils für Besuchstage und Ruhetage (montags) aufgetragen. Würde ein Einfluss auf die Innentemperatur in Abhängigkeit von den Besuchern existieren, so müsste die Innentemperatur bei einer definierten Außentemperatur an Besuchertagen größer sein als an den Ruhetagen. Der direkte Vergleich z.B. bei einer Außentemperatur von 10°C ergibt Temperaturen von 20-27°C. Auch bei einer Außentemperatur von 30°C sind bei beiden Diagrammen die Innentemperaturen relativ gleich. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass die Temperatur im Museum hauptsächlich von der Außentemperatur gesteuert wird. Die Besucher haben keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Innentemperatur.

Die Luftfeuchtigkeit könnte im System Naturstein/Mörtel ebenfalls von kritischer Bedeutung sein. Die Luftfeuchtigkeit gemessen im Innenbereich und im Außenbereich aufgetragen gegen die Besucherzahlen und gegen die Zeit ergibt keinen Zusammenhang. Die Analyse der Luftfeuchtigkeit im Museum in einem bestimmten Temperaturbereich gegen die Besucherzahlen aufgetragen zeigt keinen Zusammenhang. Bei Betrachtung der Daten im Einzelnen ist klar zu erkennen, dass die Luftfeuchtigkeit bei Besucherzahlen von 6000 eine vergleichbare Spannbreite wie an Ruhetagen aufweist. Eine Abhängigkeit zwischen der Anzahl der Besucher und den Schwankungen der Luftfeuchtigkeit ist somit nicht festzustellen.

## Zusammenfassung

Zusammenfassend muss festgestellt werden, dass das Markttor von Milet bei einer detaillierten Betrachtung sehr komplexe Schadensbilder aufweist. Neben der sehr

eigenwilligen Aufbaustrategie in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts, die durch die statischen Bedenken zu massiven Eingriffen in alle Architekturteile geführt hatten, scheint der Luftminentreffer und die damit verbundene freie Bewitterung zu wesentlichen Schadensquantitäten geführt zu haben. Die Restaurierungsmaßnahmen nach dem 2. Weltkrieg haben zwar zu einer Sicherung des Bauwerkes geführt aber durch schlechtes Material und Restaurierungsfehler wesentlich zum schleichenden Verfall beigetragen. Die z.T. sehr auffälligen strukturellen Schäden gehen vermutlich auf Materialinkompatibilitäten und statischen Zwängungen zurück. Es ist auch anzunehmen, dass die innenliegende, nach erstem Anschein biegeeweiche Stahlkonstruktion, durch Kriechen des Stahls sich verkürzt und verdreht hat. Dadurch werden die vertikalen Eigenlasten nicht mehr über das Skelett sondern u.U. außermittig von den dünneren Marmorschalen abgetragen, was die beobachteten schalenartigen Abplatzungen erklären könnte. Dies belegen die allgegenwärtigen Risse und Abplatzungen. Sinterbildungen, Rostläufer und Salzausblühungen häufig mit makroskopischen Rissen assoziiert, unterstützen diese Befunde. Der mikrobiologische Befall scheint nicht kritisch. Der Marmor zeigt ebenfalls komplexe Schadensbilder, wobei hier kein deutlicher Unterschied zwischen den auskartierten Varietäten deutlich wird. Indirekte, zerstörungsfreie Untersuchungsverfahren, wie die Ultraschalltomographie, Georadar und die Widerstandsmessungen konnten zur Charakterisierung der entkernten Marmorsäulen erfolgreich eingesetzt werden. Das Raumklima scheint bei den bis momentan nachgewiesenen Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen nicht indikativ für die nachgewiesenen Schadenstypen. Weiterführende mineralogische und baustoffkundliche Arbeiten wurden zur Analyse aller verwendeten Baustoffe eingesetzt und auf der Basis der gewonnenen Daten erfolgte die Entwicklung eines Mörtels der den Stoffeigenschaften eines Marmors weitestgehend entspricht. Diese Ergebnisse werden in einem weiteren Beitrag vorgestellt.

## Danksagung

Für die großzügige Unterstützung der Forschungsarbeiten sei hier der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gedankt. Alle Arbeiten wurden im großen MILET-Team erarbeitet. An dieser Stelle sei vor allem Prof. Heilmeyer, Dr. Kästner, Prof. Schmidt, Dr. Middendorf, Prof. U. Yaramanci, Dr. M. Hettrich, Dr. A. Just, Prof. F. Jacobs, Dr. T. Weiss, S. Endemann, H. Heckes, A. Hornschuch, Prof. R. Snethalge, Dr. E. Stadlbauer, Dr. W. Real, Dr. A. Weinmann, Dr. M. Hoppert, E. Rothert, K. Müller, S. Mack, G. Asic, Dr. M. Pfanner und der Firma SONTEC für die exzellente Zusammenarbeit gedankt.

## Literatur

Kästner, V. & Weise, S., 1992. Das Markttor von Milet. –Staatliche Museen zu Berlin – Preußischer Kulturbesitz (Führungsblatt – Nr. ANT.3).

Strocka, V.M., 1981. „Das Markttor von Milet“, 128. Winkelmannsprogramm der Archäologischen Gesellschaft zu Berlin, Verlag Walter de Gruyter & CO., Berlin.

## ABBILDUNGEN



Abb. 1: Das Markttor von Milet im Pergamon Museum auf der Museumsinsel in Berlin



Abb. 2: a) ausgebohrte, im Keller des Pergamon Museum gelagerte Säule des Markttores von Milet und b) schematischer Aufbau der Marmorsäulen am Gebäude mit Metallstützkonstruktion im Zentrum umgeben von Beton, Ziegel und Kalkmörtel sowie äußerem Rand aus Originalmarmor (Abb. 2b zur Verfügung gestellt von Dr. M. Pfanner).

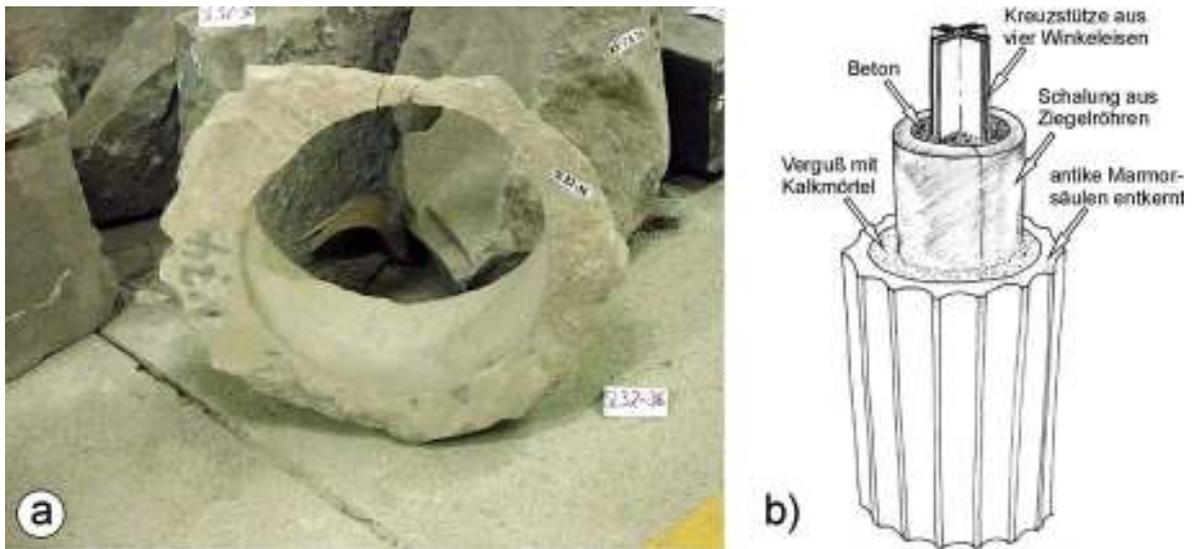


Abb. 3: Historische Bilder zeigen a) den Aufbau des Giebelbereiches der in den 20 Jahren des letzten Jahrhunderts stattfand und b) die Situation nach einem direkten Luftminentreffer des zweiten Weltkrieges.

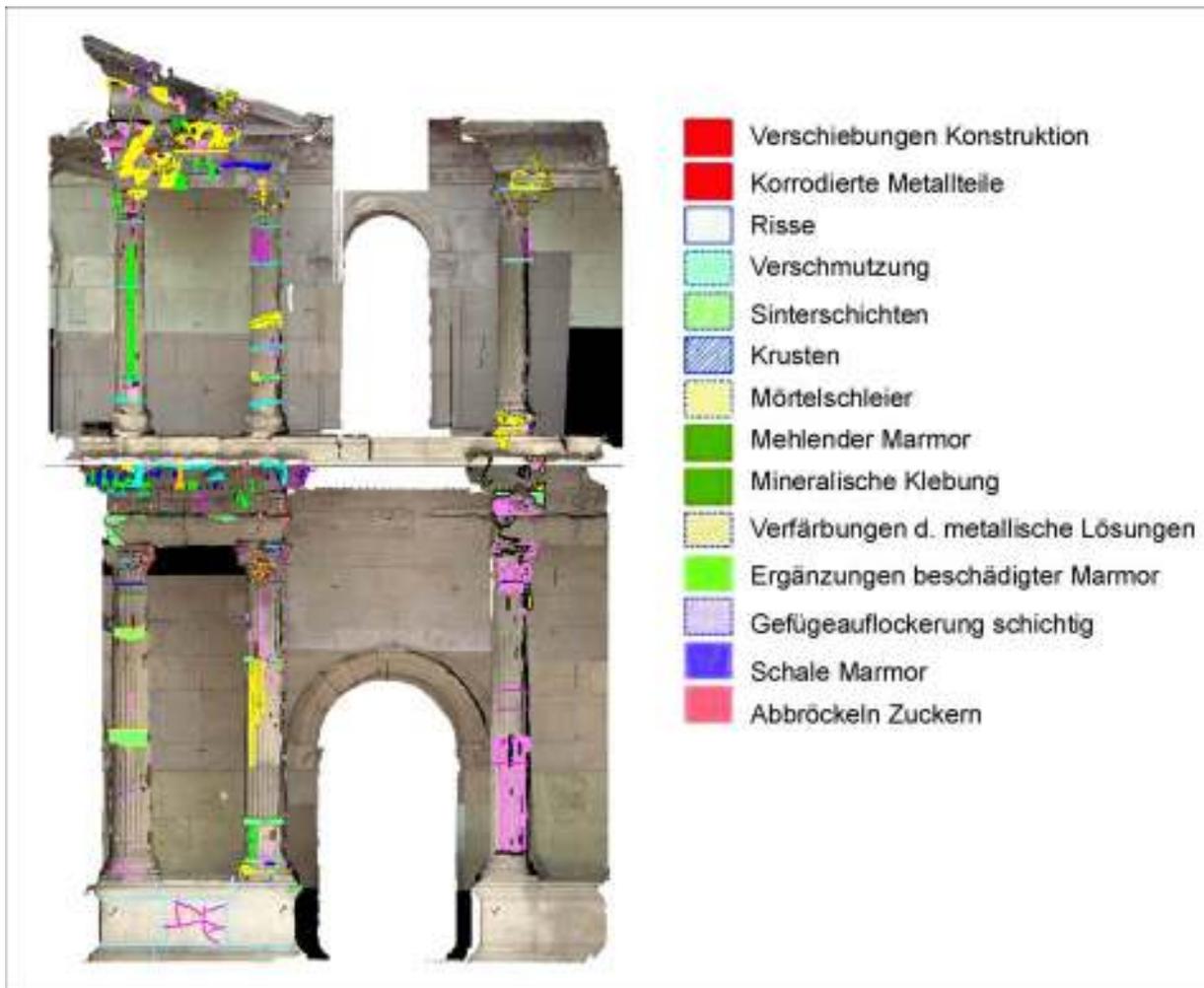


Abb. 4: Teilausschnitt der Schadenskartierung an einer Musterachse des Marktttores durchgeführt von der ARGE Speiser Endemann.



a



b



c



d

e



f





g



h

i



j



k



l



m



Abb. 5 Schadensbilder

- a) Risse mit Rostläufer, b) Rostphänomene an statisch belasteten Trägern, c) Rissbildungen und Auflockerungszonen in konstruktiv brisanten Positionen, d) Detailfoto zu 5c, e) Risse sind in den Säulen ein allgegenwärtiges Problem, wobei hier noch Abplatzungen durch den Bombentreffer beobachtbar sind, f) Riss in Architekturfragmenten aus Originalmarmor, unter einer dünnen Schicht (Patina, Lasur) ist der weiße Marmor deutlich erkennbar, g) Sinterbildungen sind häufig entlang geöffneter Risse in den Kannelurenstegen der Säulen beobachtbar, h) Spannungs-induzierte Abplatzungen an Säulenimitaten, i und j) Mörtelschleier und Sinterbildungen sind ein allgegenwärtiges Problem, k) Salzausblühungen an Mörtelergänzungen aus den 50-iger Jahren und l) auffällige schwarzbraune Verfärbung der Oberfläche durch Mikroorganismen, m) Schutzanstriche im Bereich der Kapitelle führen zu deutlichen Verfärbungen

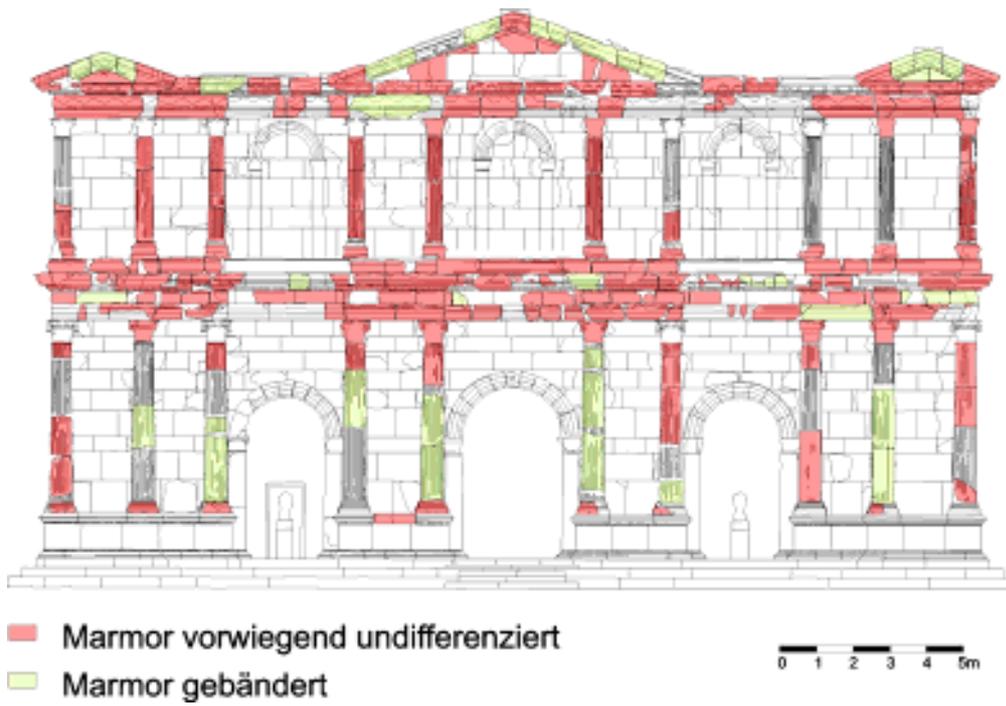


Abb. 6: Lithologische Karte zeigt die Verteilung der beteiligten Marmortypen am Markttor.

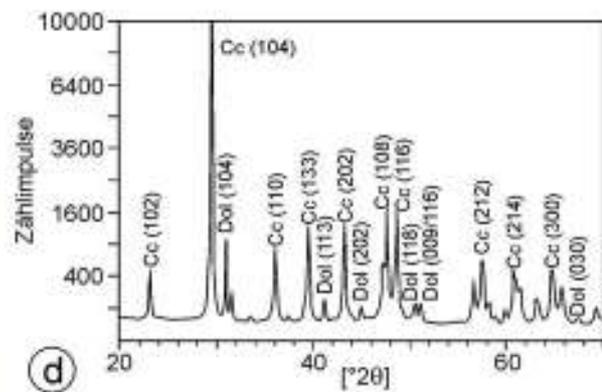
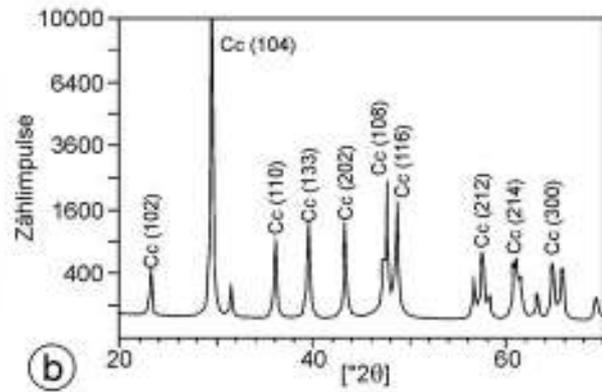


Abb. 7: Makroskopisches Erscheinungsbild und mineralogische Zusammensetzung der am Markttor von Milet verbauten Marmortypen: a) Vorwiegend undifferenzierter Marmor und c) unregelmäßig gebänderter Marmor. In c) und d) sind die jeweiligen Diagramme der Röntgendiffraktometrie abgebildet. Im Gegensatz zum vorwiegend undifferenzierten Marmor weist der gebänderte neben Calcit (cc) auch geringe Mengen von Dolomit (dol) auf.

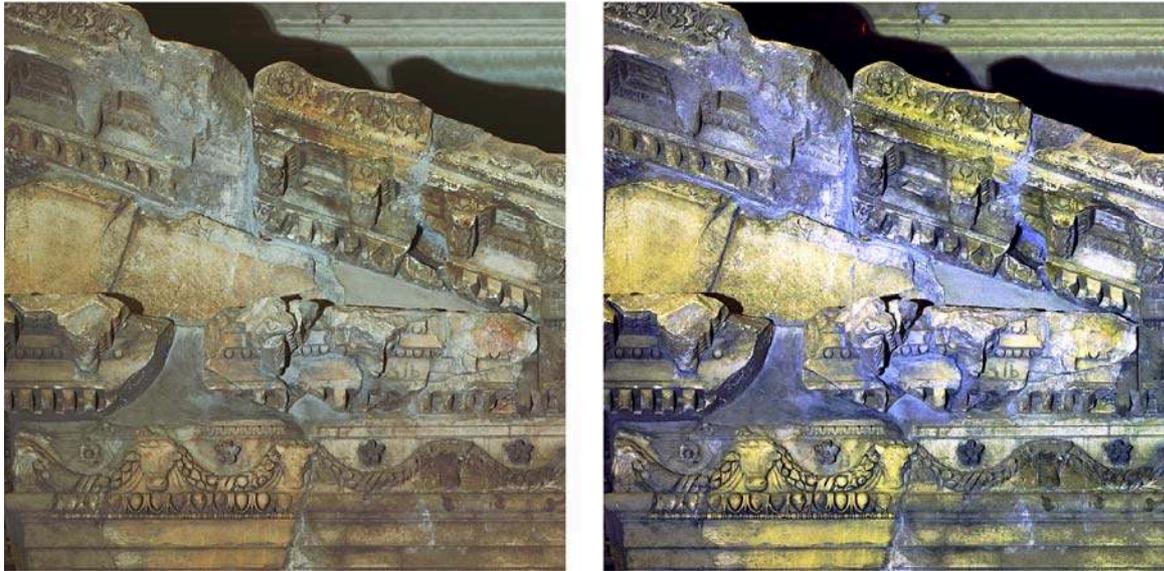


Abb. 8: a) Multispektralbild mit der Bandkombination R, Gw und B zur Visualisierung des Farbeindrucks. b) Multispektralbild mit den Bandkombinationen IR, R, UV. Fugen und Flächen mit einem Mörtelschleier werden deutlich blau abgebildet.

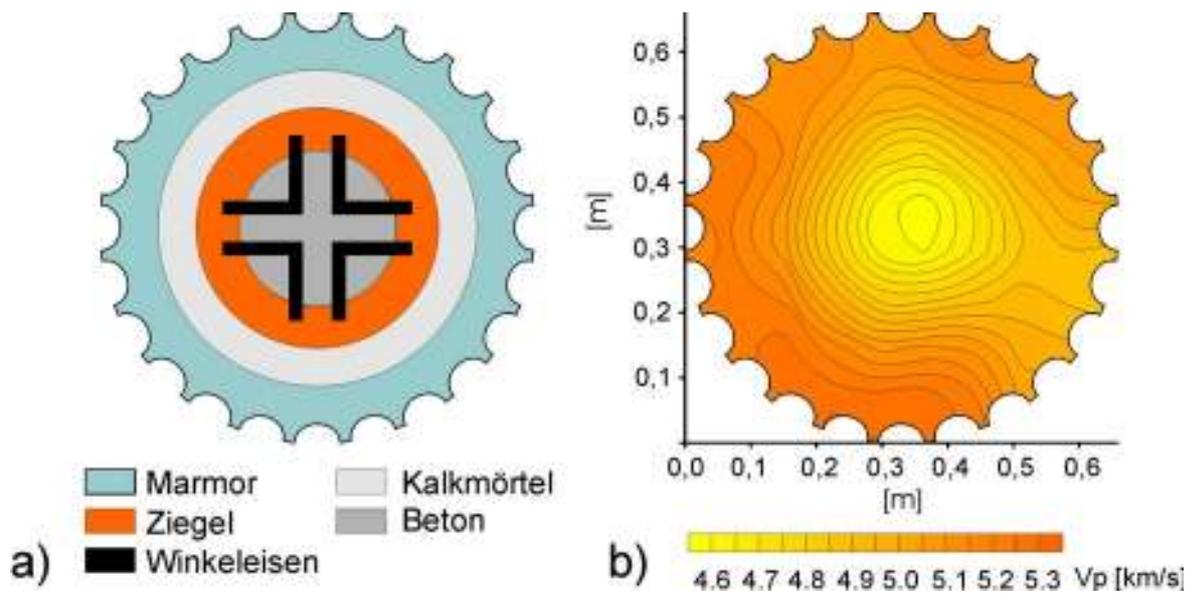


Abb. 9: Ultraschalltomographische Erfassung des inneren Aufbaus einer Säule im Querschnitt: a) Vermuteter innerer Aufbau und b) ultraschalltomographische Inversion des Säulenquerschnitts (Erläuterungen s. Text).

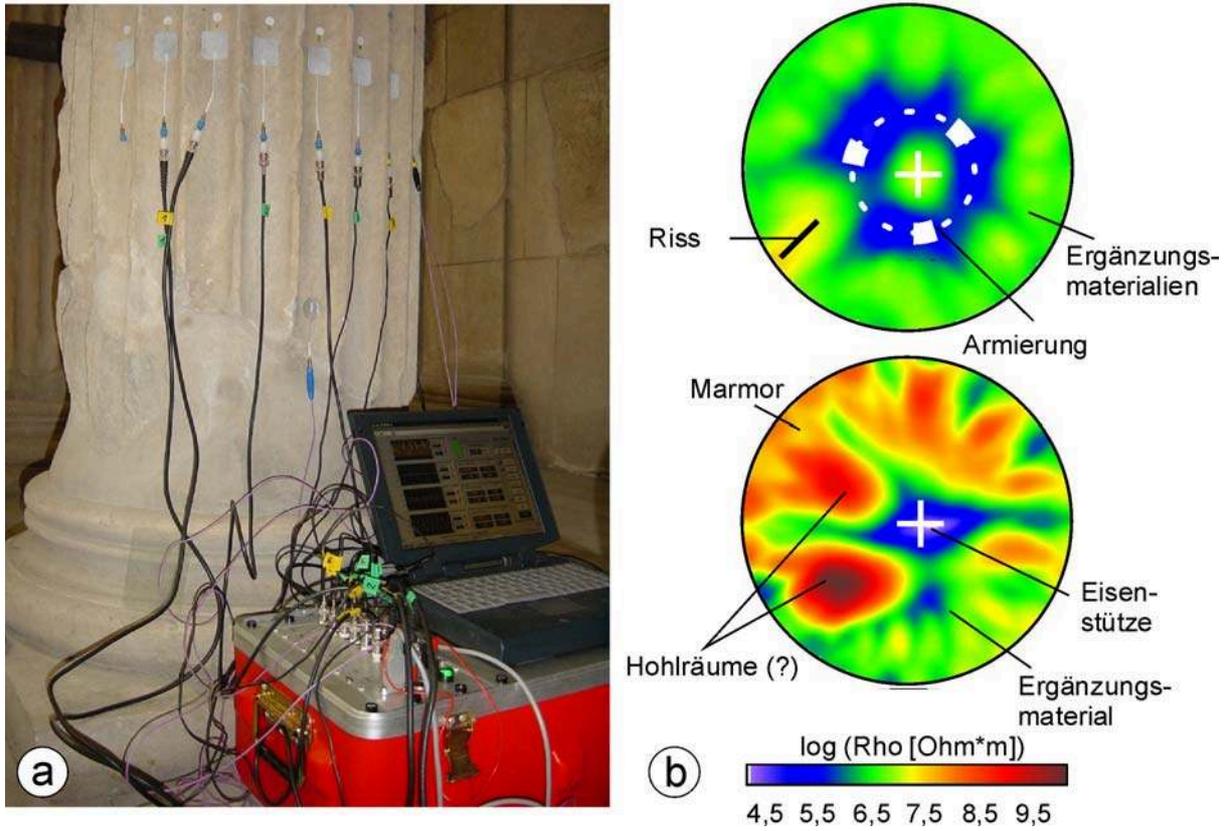


Abb. 10. Elektrische Widerstandsmessungen in zwei Ebenen an einer ausgesuchten Säule

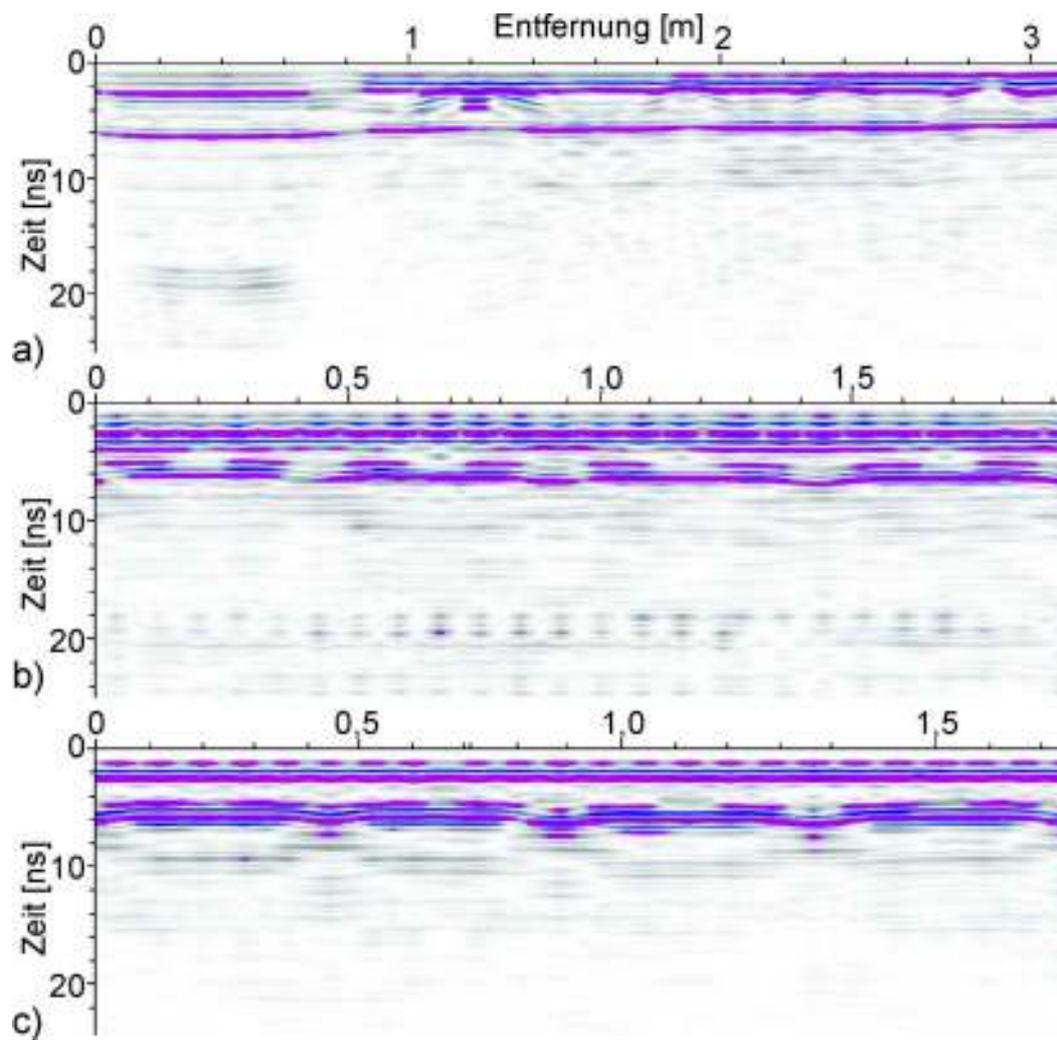


Abb. 11 Radarschnitte der untersuchten Säule: a) Vertikaler Schnitt durch die Säule von oben nach unten verlaufend, b) horizontaler Schnitt auf 0,6 m und c) auf 1,6 m Höhe ausgehend vom Säulenfuß.

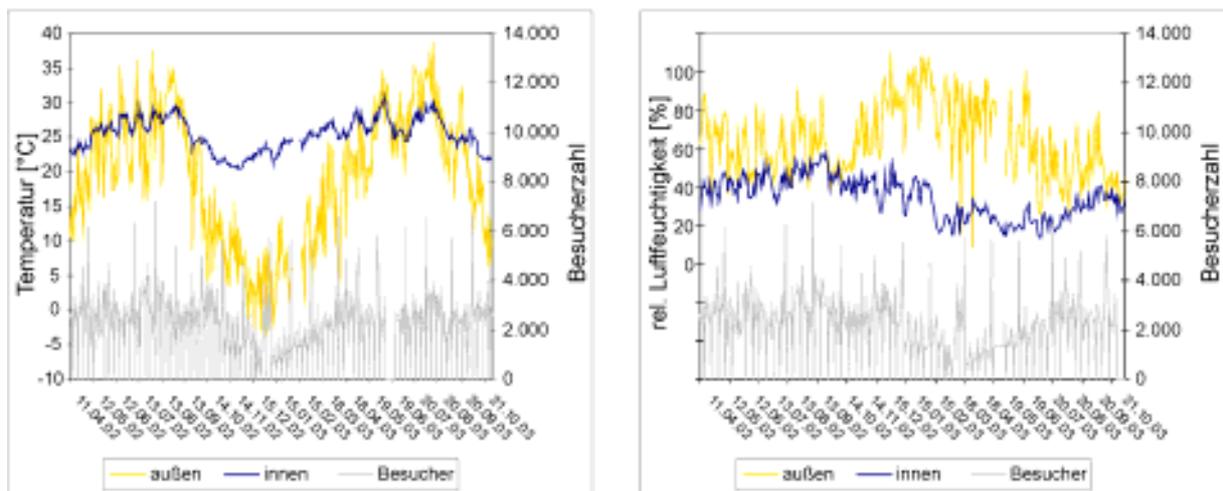


Abb. 12 Tagesmittelwerte a) der Temperatur und b) der relativen Luftfeuchtigkeit eines Messfühlers im Außen- und eines Messfühlers im Innenbereich sowie die Besucherzahl im Verlauf eines Jahres.



## Anlage 7

Gesteinstechnische Eigenschaften ausgebauer Marmore  
des Markttores von Milet.

Bachelorarbeit, Elke Rothert, Geowissenschaftliches  
Zentrum der Universität Göttingen.



# **Gesteinstechnische Eigenschaften ausgebauter Marmore des Markttores von Milet**

## **Bachelorarbeit**

zur Erlangung des Grades

### **Bachelor of Science**

in der Fachrichtung  
Geowissenschaften

vorgelegt von

**Elke Martina Rothert**

aus Wilhelmshaven

angefertigt am

**Göttinger Zentrum Geowissenschaften**  
Abteilung Strukturgeologie / Geodynamik  
**Georg – August – Universität Göttingen**

**2002**

## **Danksagung**

An dieser Stelle möchte ich einigen Personen für ihre Unterstützung danken, mit deren Hilfe die Bachelorarbeit zum jetzigen Zeitpunkt fertig werden konnte.

Zunächst bedanke ich mich bei Prof. Dr. Siegfried Siegesmund für die Vergabe der Bachelorarbeit.

Mein Dank gilt weiterhin Dr. Axel Vollbrecht für die Übernahme des Korreferats.

Ein ganz besonderes Lob geht an Jörg Rüdric für die zeitintensive Unterstützung und Betreuung in allen Bereichen meiner Arbeit. Durch seine Hilfs- und Diskussionsbereitschaft hat er wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen.

Bei Prof. Dr. W.D. Heilmeyer und Dr. V. Kästner bedanke ich mich für die Unterstützung bei der Probenahme. P. Nordhoff und S. Speiser danke ich für die Bereitstellung von Fotomaterial.

Daniel Strohmeyer danke ich für die Einführung und Betreuung bei der thermischen Dilation, sowie für Hilfestellungen am Computer.

Herrn Dr. Gerald Hartmann und Frau Angelika Reitz für spontane Zeitaufwendung und Bereitstellung von Geräten für die RFA-Analyse.

Bei Dr. Klaus Wemmer bedanke ich mich für die Hilfe bei der RDA-Analytik.

Ebenfalls möchte ich mich bei Andreas Koch für die Einführung in die kapillare Wasseraufnahme danken, sowie bei Dr. Thomas Weiss für die Computerkenntnisse und das Korrekturlesen.

Weiterhin möchte ich meinen FreudInnen und StudentenInnen des derzeitigen 7. Semesters danken. Mein Dank gilt dabei besonders Andre Hüpers und Christian Müller für ihre unverzichtbaren Computerkenntnisse und Matthias Weehuus für die Hilfe bei der Durchsicht der Arbeit.

Bei Daniel Powollik bedanke ich mich ganz herzlich für die mentale Unterstützung und Motivation während der Arbeit und dem gesamten Studium. Das gleiche gilt für meine Eltern und Geschwister, die mir während der ganzen Zeit eine große Hilfe waren.

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>1. EINLEITUNG</b> .....	<b>1</b>
1.1 ALLGEMEINES.....	1
1.2 AUFGABENSTELLUNG .....	2
<b>2. DAS MARKTTOR VON MILET</b> .....	<b>3</b>
<b>3. UNTERSUCHTES PROBENMATERIAL</b> .....	<b>6</b>
3.1 DEFINITION VON MARMOR .....	6
3.2 PROBEN VOM MARKTTOR VON MILET .....	6
<b>4. METHODIK</b> .....	<b>9</b>
4.1 DURCHLICHTMIKROSKOPIE .....	9
4.2 KATHODOLUMINESZENZ-MIKROSKOPIE (KLM) .....	9
4.3 RÖNTGENFLUORESZENZANALYSE (RFA).....	10
4.4 RÖNTGENDIFFRAKTOMETERAUFNAHME (RDA) .....	11
4.5 TEXTURANALYSE.....	12
4.6 POROSITÄT, PORENRADIENVERTEILUNG UND KAPILLARE WASSERAUFNAHME.....	13
4.7 THERMISCHE DILATATION .....	16
<b>5. ERGEBNISSE</b> .....	<b>18</b>
5.1 GEFÜGEKUNDLICHE UND PETROGRAPHISCHE EIGENSCHAFTEN.....	18
5.1.1 Mikrogefüge .....	18
5.1.2 Textur.....	23
5.1.3 Röntgendiffraktometeraufnahme / Röntgenfluoreszenzanalyse.....	24
5.2 PETROPHYSIKALISCHE EIGENSCHAFTEN .....	26
5.2.1 Porosität / Porenradienverteilung .....	26
5.2.2 Kapillare Wasseraufnahme.....	29
5.2.3 Thermische Dilatation .....	33
<b>6. ZUSAMMENFASSUNG UND DISKUSSION</b> .....	<b>40</b>
<b>7. LITERATURVERZEICHNIS</b> .....	<b>42</b>
<b>ANHANG</b> .....	<b>45</b>

---

## Verzeichnis der Fototafeln

Tafel 1: Makrofotos.....	7
Tafel 2: Probenmaterial.....	8
Tafel 3: Mikrogefüge.....	21
Tafel 4: KL-Mikroskopie.....	22

# 1. Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Marmor gilt als besonderer Werkstein, aus dem über Jahrtausende hinweg bis in die Gegenwart bedeutende architektonische Bauteile und Schmuckelemente geschaffen wurden. Ein großer Teil des kulturellen Erbes der Menschheit wird von Marmor gebildet. Da die Natursteine den negativen Umwelteinflüssen ausgesetzt sind, kommt es durch physikalische, chemische und biologische Prozesse zur Gefügebrauchung und damit zum Zerfall des Gesteins. Um die Kulturgüter der Geschichte auch für spätere Generationen zu erhalten, ist es notwendig sie nachhaltig zu schützen.

Das Markttor von Milet ist ein bedeutendes archäologisches Baudenkmal. Es ist nicht nur ein beeindruckendes Zeugnis der römischen Baukunst in Kleinasien, sondern ist vor allem durch den Wiederaufbau innerhalb eines Museums in Deutschland einzigartig. Die Trümmer der zweistöckigen Marmorfassade wurden 1903 bei Grabungen unter deutscher Aufsicht in der Stadt Milet geborgen und 1907-1908 nach Berlin überführt. 1930 war der Aufbau im Pergamonmuseum vollendet. Während dieses Aufbaues wurden die Säulen aus statischen Gründen bis auf eine 0,03 m starke Außenwand ausgebohrt, auf ein Stahlsystem gezogen und teilweise mit Beton ausgegossen. Da jedoch Dokumentationsmaterial nur zum Teil überliefert wurde, ist der innere Aufbau des Markttores, wie auch der bauliche Zustand unklar.

Im Zuge der Umbaumaßnahmen des Pergamonmuseums muss, aufgrund der Statik des Gebäudes, das Markttor in den kommenden Jahren abgebaut werden. Das Schadensbild des verwendeten Marmors reicht von Rissbildung, abgeplatzten Kanten bis zu Salzausblühungen und Krustenbildung. Besonders im rechten Giebelbereich, der während des 2. Weltkrieges von einer Bombe getroffen wurde, sind starke Schäden zu beobachten.

Aufgrund der starken Schädigung des Objektes ist vor dem Abbau eine detaillierte Schadensaufnahme sowie eine detaillierte Gesteinsaufnahme, inklusive einer Zustandsbeschreibung, zwingend notwendig.

Diese Untersuchungen werden im Rahmen des Projektes „Das Markttor von Milet: Schadensanalyse und modellhafte Sanierungskonzepte“, geleitet von Herrn Prof. Dr. Siegfried Siegesmund vom Geowissenschaftlichen Zentrum Göttingen, durchgeführt und durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt gefördert.

## 1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, die wesentlichen petrographischen, gefügekundlichen und gesteintechnischen Eigenschaften, der am Markttor von Milet verbauten Marmore zu ermitteln. Dazu wurden zwei makroskopisch verschiedene Proben des Markttores gezielt ausgewählt (s. Kapitel 3.2).

Für die petrographischen und gefügekundlichen Untersuchungen kamen die konventionellen Analysemethoden, Durchlicht- und Kathodolumineszenzmikroskopie, zum Einsatz. Anschließend wurde die chemische Zusammensetzung durch die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und die Röntgendiffraktometeraufnahme (RDA) bestimmt.

Zu den petrophysikalischen Untersuchungen gehören die Ermittlung der Porosität und Porenradialverteilung, um die wichtigsten Kenngrößen des Porenraumes zu bestimmen.

Die Verteilung von Makro-, Kapillar- und Mikroporen ist entscheidend für die hygrischen Eigenschaften und damit für das Verwitterungsverhalten eines Gesteins. In dem Zusammenhang wurde ebenfalls die kapillare Wasseraufnahme untersucht. Der dabei ermittelte  $w$ -Wert gibt an, welche Menge Wasser pro Flächeneinheit in Abhängigkeit von der Zeit kapillar aufgenommen wird.

Die Ermittlung des Dehnungsverhalten, sowie der thermisch induzierten Längenänderung (Restdehnung) erfolgten mittels der thermischen Dilatation. Die Untersuchungen der thermischen Dilatation ist von entscheidender Bedeutung, da sie als wichtigste primäre Ursache für die Marmorverwitterung anzusehen ist (vgl. WIDHALM et al., 1996). Durch Texturuntersuchungen sollte weiterhin gezeigt werden, ob kristallographische Vorzugsorientierungen existieren, die die richtungsabhängigen physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Marmors bestimmen.

Mit dieser Vielzahl von Einzeluntersuchungen und Kombination der Ergebnisse soll der Kenntnisstand über die verbauten Marmore erweitert werden. Letztendlich ermöglicht dies Aussagen über den Zustand des Gesteins zu treffen und damit auch Hilfestellung für die Entwicklung problemangepasster Sanierungsstrategien zu geben.

## 2. Das Markttor von Milet

Milet gehörte im Altertum unter der römischen Herrschaft zu den bedeutendsten griechischen Städten an der Westküste Kleinasiens. Sie war im 11. Jh. v. Chr. der Sage nach durch Neleus von Pylos, Sohn des Meergottes Poseidon, gegründet worden.

Die Stadt befand sich auf einer Halbinsel in der großen Mündungsbucht des Mäanders (Abb. 1). Diese Lage bot günstige Voraussetzungen für einen Seehandelsplatz. Aufgrund dieser geographischen Position direkt am Meer, war Milet im 8. Jh. v. Chr. bereits eine reiche Handelsstadt. Heute ist diese Bucht vollständig verlandet (KÄSTNER, 1992).



Abb. 1: Geographische Lage der Stadt Milet, SW Türkei.

Das Markttor von Milet ist eine prunkvolle, zweistöckige Marmorfassade (Abb. 2). Es bildete das Nordtor zum Staatsmarkt der kleinasiatischen Stadt Milet. Genauer betrachtet, befand es sich südlich der Löwenbucht. Vermutlich wurde es zwischen 120 und 130 n. Chr. errichtet und, wie Inschriften belegen, aus städtischen Mitteln finanziert. Durch den Verbund des griechischen Säulenpropylon, den Bogentoren und der römischen Bühnenfassade wurde die hellenistische Bautradition mit der zeitgemäßen römischen Baukunst im Markttor vereint.



Abb. 2: Das Markttor von Milet im Pergamonmuseum von Berlin.

Auf einem dreistufigen, 28,92 m breiten Unterbau erhebt sich mit zwei vorspringenden Seitenflügeln der symmetrisch gegliederte Sockel. Das in gleicher Art gegliederte Obergeschoss des Tores wird durch jeweils vorgelagerte, paarweise angeordnete Säulen getragen. Der Sockel des Obergeschosses wird durch dem Architrav, dem Rankenfries, dem Gesims und die durchgehende aufliegende Kassettendecke gebildet. Bis zur Spitze des Mittelgiebels misst das Tor 16,68 m und erreicht eine Tiefe von 6,70 m.

Unter Kaiser Justinian wurde der Stadtkern von Milet um 538 n. Chr. zur Festung gegen die Perser ausgebaut. Dabei wurde das Markttor in die Befestigungsmauer einbezogen, wobei die Seitentore geschlossen wurden. Das Mitteltor erhielt anstelle des Rundbogens einen geraden Türsturz.

Im Mittelalter wurde das Tor vermutlich durch ein Erdbeben zerstört und verschüttet.

Die Trümmer der Fassade wurden 1903 bei Grabungen unter deutscher Aufsicht von dem Archäologen Theodor Wiegand und dem Architekten Hubert Knackfuß entdeckt. Nach einer Fundteilung mit den türkischen Behörden konnten 1907-1908 etwa 750 t Originalteile nach Berlin überführt werden. In den Jahren 1925-1929 wurde das Markttor unter der Leitung des Archäologen Wilhelm von Massow im neuen Pergamonmuseum wieder aufgebaut (KÄSTNER, 1992).

Im Zuge dieser Aufbaumaßnahmen wurden alle Säulenschäfte aus statischen Gründen bis auf eine Außenwand mit einer Stärke von ca. 0,03 m ausgebohrt und im Inneren mit durchlaufenden Stahlstützen versehen, sowie teilweise mit Beton ausgegossen. Weiterhin wurden alle Teile auf einem Eisengerüst montiert und entsprechend Säulen, Kapitelle und Gebälke durchbohrt (STROCKA, 1981). Die ausgebohrten Gesteinszylinder sowie weitere Bauteile, die aus Sicherheitsgründen nicht eingebaut wurden, sind im Keller des Pergamonmuseums gelagert.

Während des 2. Weltkrieges wurde der rechte Flügel des Markttores durch einen Bombentreffer stark beschädigt. Außerdem verursachte dieser Luftminentreffer am gesamten Objekt starke Schäden, wie z.B. Abplatzungen und Einschlagskrater.

Durch die Beschädigung des Museumsdaches war darüberhinaus das Markttor den folgenden Winter den natürlichen, klimatischen Bedingungen ausgesetzt.

Nach zweijährigen Wiederherstellungsmaßnahmen unter der Leitung von Hans-Herbert Völker konnte 1954 das Markttor von Milet wieder der Öffentlichkeit präsentiert werden.

Woher der verwendete Marmor stammt, ist bislang noch unklar. Es laufen aber dazu Untersuchungen mit dem Ziel, das Probenmaterial zu charakterisieren und mit Marmoren aus Lagerstätten in der Umgebung zu vergleichen. Prof. T. Cramer von der TU Berlin leitet diese Untersuchungen.

### **3. Untersuchtes Probenmaterial**

#### **3.1 Definition von Marmor**

Marmor ist mineralogisch wie auch geochemisch ein relativ einfach zusammengesetztes Gestein. Er besteht im Wesentlichen aus Calcit (Calcitmarmor) und / oder Dolomit (Dolomitmarmor). In den Geowissenschaften versteht man unter Marmor das Produkt einer metamorphen Überprägung von Kalkstein. Das wichtigste Merkmal der metamorphen Überprägung ist dabei die mit der Rekristallisation einhergehende Gefügeveränderung (z.B. Kornvergrößerung) (SIEGESMUND et al., 2001).

#### **3.2 Proben vom Markttor von Milet**

Die in dieser Arbeit untersuchten Proben stellen ausgebohrte Kerne von Säulen des Markttores von Milet dar. Diese wurden 1925 bei den Aufbaumaßnahmen im Keller des Museums gelagert. Es wurden makroskopisch phänomenologisch zwei unterschiedliche Marmore ausgewählt (s. Tafel 1). Bei der einen Probe handelt es sich um einen klein- bis mittelkörnigen Marmor mit einer deutlich sichtbaren Foliation (Probe 32). Die Probe war 80 cm lang und hatte einen Durchmesser von 30 cm (s. Tafel 2, Bild 1).

An den Enden der Säule waren wertvolle archäologische Beschläge angebracht. Um die Fassungen zu bewahren, wurden die Einzelstücke abgesägt und archiviert.

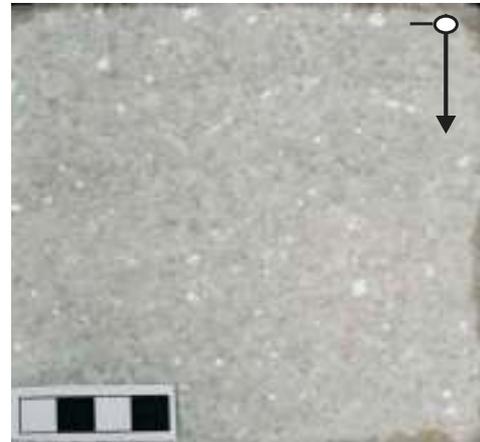
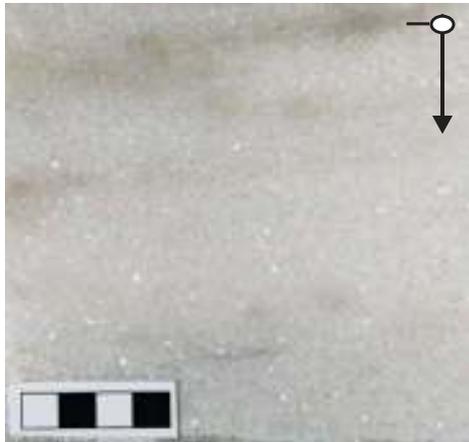
Bei dem anderen Kern handelt es sich dagegen um einen mittel- bis grobkörnigen Marmor, der makroskopisch keine Inhomogenitäten aufweist (Probe 68). Die Probe war max. 50 cm lang und hatte einen Durchmesser von 27 cm (s. Tafel 2, Bild 2).

Bei den anderen im Keller befindenden Säulen und Kernen konnten weitere makroskopische Gefügemerkmale festgestellt werden (s. Tafel 2, Bild 3-6). Dazu gehören unterschiedliche Ausbildungsformen einer grauen Bänderung (Mächtigkeiten bis zu 0,5 cm), sowie rötliche Bänder. Außerdem wurden mehrere mineralisierte Risse beobachtet, die z.T. bevorzugt zurückgewittert oder im Zentrum bzw. am Rand geöffnet sind. Weiterhin sind nicht-mineralisierte offene Risse zu beobachten. Diese stellen mechanische Schwachstellen dar, an denen es an mehreren Säulen bereits zum Bruch gekommen ist. Des Weiteren sind bei einigen Säulen Mineraldomänen zu beobachten, die eine lagenförmige Anordnung aufweisen.

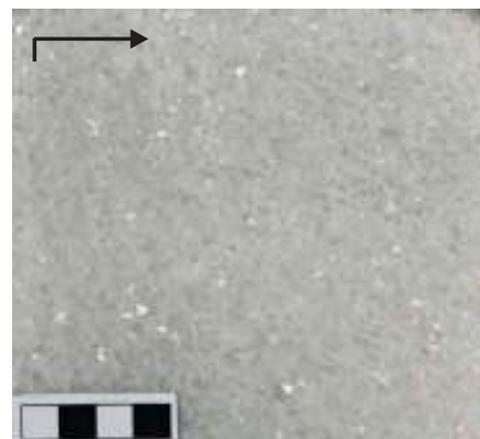
**Tafel 1: Makrofotos**

Probe 32

Probe 68



**YZ-Fläche**



**XZ-Fläche**



**XY-Fläche**

**Maßstab = 2 cm**

## Tafel 2: Marmorproben



**Abb. 1:** Probe 32 mit deutlicher Foliation, Probenlänge 80 cm.

**Abb. 2:** Probe 68, homogener Marmor, Probendurchmesser 27 cm.

**Abb. 3:** Marmor mit grauer Bänderung.

**Abb. 4:** Marmor mit rötlichen Mineraldomänen.

**Abb. 5:** Marmor mit mineralisiertem Riss, welcher im Zentrum geöffnet ist.

**Abb. 6:** Marmor mit domänenhaft angeordnete rötliche Minerale, die zurückgewittert sind.

## 4. Methodik

Für die meisten Untersuchungsmethoden wurden die Proben jeweils in drei orthogonalen Raumrichtungen (X, Y, Z) nach dem Referenz-Koordinatensystem angefertigt (Abb. 3). Dieses Probenkoordinatensystem wird durch makroskopische Gefügeelemente wie Foliation und Lineation definiert.

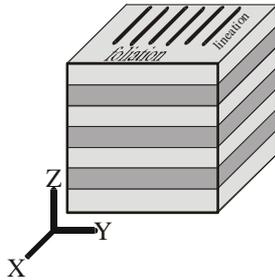


Abb. 3: Probenkoordinatensystem in Bezug zu Foliation und Lineation, aus WEISS et al. (1999).

### 4.1 Durchlichtmikroskopie

Die Durchlichtmikroskopie gehört zu den wichtigsten Untersuchungsmethoden in den Geowissenschaften und dient der Ermittlung der mineralogischen Zusammensetzung und des Gefüges eines Gesteins. Besondere Beachtung fand dabei das Korngefüge (Korngröße, Kornform und -regelung, Korngrenzen und -orientierung etc.), da es Auskunft über den strukturellen Aufbau des Gesteins gibt. Das Korngefüge hat des Weiteren einen entscheidenden Einfluß auf die Entfestigung von kristallinen Marmor, da diese häufig durch eine Rissbildung an Korngrenzen gekennzeichnet ist. Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Erfassung von intrakristallinen Schwachstellen, wie Spaltflächen und Zwillingslamellen.

Die polarisationsoptische Untersuchungsmethode wurde jeweils an hochpolierten Dünnschliffen im Standardformat (Dicke: 30 µm) durchgeführt.

### 4.2 Kathodolumineszenz-Mikroskopie (KLM)

Zu den petrographischen und gefügekundlichen Untersuchungen gehörte weiterhin die Kathodolumineszenz-Mikroskopie. Dabei werden Festkörper infolge von Bestrahlung mit Elektronen zum Leuchten angeregt. Die KLM dient der Beschreibung von Fluid-Gesteinswechselwirkungen. Durch diese Methode können verheilte oder mineralisierte Klüfte, sowie Korngrenzen ermittelt werden. Darüber hinaus erlaubt dieses Verfahren, aufgrund der KL-Farben, eine einfache Unterscheidung der vorhandenen Mineralphasen.

Diese Methode wurde an hochpolierten und kohlenstoffbedampften Dünnschliffen durchgeführt, die sich in einem Hochvakuum befanden. Die Untersuchung wurden von Dr. J. Götze an der TU Bergakademie Freiberg durchgeführt.

### 4.3 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Die Gesamtgesteinschemie der Marmorproben erfolgte durch die RFA mit einem wellenlängendispersiven „Philips PW 1480“-Sequenzspektrometer (Abb. 4).

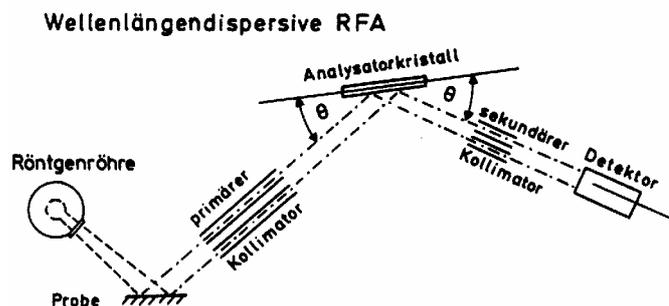


Abb. 4: Prinzip der wellenlängendispersiven RFA, aus HAHN-WEINHEIMER et al. (1984).

Die tatsächlichen Bestimmungsgrenzen für die Elemente Sc, V, Co, Cr, Zn, Rb, Ga, Sr, Y, Nb und Th liegen bei 5 ppm und für die Elemente Ni, Zr, Ba, Pb, Ce bei 10 ppm.

Für diese Untersuchung wurde eine Schmelztablette aus 4,2 g Flussmittel (Lithiumtetraborat) und 0,7 g Probenpulver hergestellt. Vier Proben (32.1, 32.2, 68 mit Riss, 68 ohne Riss) wurden der Analyse unterzogen.

In einer 3 kW-Röntgenröhre werden Elektronen mit einer Spannung von 60 kV (negative und optimale Spannung) bis maximal 125 kV beschleunigt, die anschließend auf die Rhodiumanode treffen. Die Anode entsendet daraufhin die für Rhodium charakteristische Röntgenstrahlung, die dann auf das Präparat trifft. Die Energie dieser primären Röntgenstrahlung ist groß genug, um kernnahe Elektronen aus dem Atom der Probe herauszuschleudern. Anschließend fallen aus energetischen Gründen Elektronen aus den äußeren, energiereicheren Schalen auf die inneren, energieärmeren Lücken, wobei sekundäre Röntgenstrahlung entsteht, die elementspezifisch ist. Diese Fluoreszenzstrahlung passiert den primären Kollimator und trifft auf einen Analysatorkristall, der als Monochromator fungiert.

Die Röntgenstrahlung wird an den Netzebenen des Monochromators gebeugt und somit in die

Die reflektierten Strahlen überlagern sich nur dann konstruktiv, wenn die Braggsche Gleichung erfüllt ist; dadurch wird die reflektierte Strahlung verstärkt.

Braggsche Gleichung:  $n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\theta$

$d$  = Netzebenenabstand des Analysatorkristalls       $n$  = ganzzahliges Vielfaches

$\theta$  = Winkel zwischen Primärstrahl und Netzebene       $\lambda$  = Wellenlänge

Der primäre sowie der sekundäre Kollimator vor und hinter dem Analysatorkristall sorgen für die Ausfilterung der divergenten Strahlung.

Der Detektor wandelt am Ende die Energie der Röntgenquanten in elektrisch meßbare Signale um. Als Ergebnis erhält man die spektrale Verteilung und die Intensität der Röntgenstrahlung, wobei die jeweilige Wellenlänge charakteristisch für jedes Element und die Strahlungsintensität dem Massenanteil proportional ist.

#### 4.4 Röntgendiffraktometeraufnahme (RDA)

Die Aufnahmen erfolgten an einem PW 1800 Röntgengerät, das sich für die Diagnostizierung kristallinen Materials eignet (Abb. 5).

Das Diffraktometer besteht im Wesentlichen aus der Strahlenquelle (Hochspannungsgenerator und Röntgenröhre), dem eigentlichen Diffraktometer und dem Detektor.

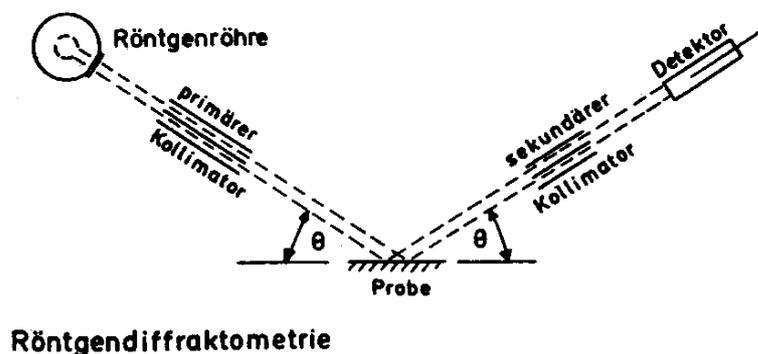


Abb. 5: Grundprinzip der RDA, wobei der Graphitmonochromator und die automatische Divergenzblende des PW 1800 nicht dargestellt sind, aus HAHN-WEINHEIMER et al. (1984).

Die Strahlenquelle ist eine Röntgenröhre mit einer Kupferanode. Die Elektronen werden mit einer Spannung von 40 kV im Vakuum beschleunigt und treten in Wechselwirkung mit den Cu-Atomen der Anode. Ein Graphiteinkristall ist vor dem Detektor als Monochromator geschaltet, dessen Aufgabe es ist, Strahlung eines bestimmten, eng begrenzten Wellenlängenbereiches zu reflektieren. Der Strahlengang wird durch verschiedene Blenden vor und hinter der Probe kontrolliert, wodurch eine wesentlich höhere Auflösung erreicht wird. Eine dieser Blenden ist die automatische Divergenzblende, die für eine konstante Fläche der auftreffenden Strahlung sorgt und die Peak-Höhen über den gesamten Messbereich vergleichbar macht.

Der Detektor (Zählrohr), der sich mit doppelter Winkelgeschwindigkeit ( $2\theta$ ) wie der Kristall um den Messkreis dreht, registriert die primäre Strahlung. Die wird wiederum in ein elektrisches Signal umgewandelt und nach Verstärkung der computerisierten Datenverarbeitung zugeführt.

Bei diesem Verfahren gilt die Braggsche Gleichung, da sonst keine Beugung der primären Strahlung erfolgen würde.

Das Röntgenverfahren erfolgt an Pulvertabletten. Die Gesteinsproben werden in der Achat-Kugelmühle zerkleinert und anschließend in die Probenhalter, nach dem Backloading-Verfahren der Firma Philips, gefüllt.

Es wurden vier Proben (32.1, 32.2, 68 mit Riss, 68 ohne Riss) im Bereich von  $4 - 70^\circ 2\theta$  im step scan-Verfahren gemessen, mit einer Schrittweite von  $0,02^\circ 2\theta$ . Die Messdauer pro Step beträgt 3 Sekunden, so dass 3100 Einzelsteps gemacht werden. Daraus ergibt sich eine Messdauer pro Probe von 3:01:33.

Die Auswertung erfolgte mit einem Programm der Firma Philips PW 1877 APD (Automated Powder Diffraction). Das Ergebnis stellt ein Diagramm der Intensität als Funktion von dem  $^\circ 2\theta$ -Winkel dar. Anschließend wurden die einzelnen Peakintensitäten den Mineralphasen zugeteilt.

## 4.5 Texturanalyse

Die Texturuntersuchungen hatte zum Ziel, die kristallographische Vorzugsorientierung der beteiligten Mineralphasen innerhalb der Marmore zu erfassen. Texturen entstehen unter natürlichen Bedingungen durch gerichtetes Wachstum oder Deformationsvorgänge.

Besitzen die beteiligten Mineralphasen eine Kristallgitteranisotropie, wie es beim Calcitkristall der Fall ist, so bestimmen die Texturen maßgeblich die richtungsabhängigen mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Marmors (z.B. Bruchanisotropie, thermische Eigenschaften) (SIEGSMUND et al., 2001).

Zur Erfassung der Textur werden in den Wissenschaften verschiedenen Verfahren angewendet. In der vorliegenden Arbeit wurde die Neutronengoniometrie angewendet. Dieses Verfahren erlaubt, im Gegensatz zu der Röntgengoniometrie, die Bestimmung von Texturen für größere Probenvolumina mit Korngrößen über 100  $\mu\text{m}$ .

Diese quantitative Texturanalyse erfolgte am Forschungsreaktor des Frank Laboratory for Neutron Physics in Dubna (Russland). Dazu wurden zylindrische Proben mit einer Dicke und Durchmesser von 3 cm verwendet. Die Untersuchungen sowie die Auswertungen, d.h. die Ermittlung von Polfiguren in verschiedenen Netzebenenscharen, wurden von Dr. K. Ullemeyer durchgeführt.

#### **4.6 Porosität, Porenradienverteilung und kapillare Wasseraufnahme**

Die **Porosität** beschreibt das Verhältnis aller in einem Gestein vorhandenen Hohlräume zum Gesteinsvolumen (FITZNER & BASTEN, 1994). Der Porenraum im Marmor ist im Wesentlichen durch offene Risse gekennzeichnet, die vorwiegend während der Verwitterung initial gebildet und fortschreitend geöffnet werden (GRIMM, 1999). Der Porenraum kann mit wässriger Lösung, Dampf oder Luft gefüllt sein. Erhöhte Porositäten führen zum verstärkten Eindringen von Wasser, wodurch weitere Verwitterungsprozesse, wie Frostsprengung, hygrische Dehnung und chemische Lösung einsetzen können (KÖHLER, 1991).

Die Porosität wurde in dieser Arbeit mittels Auftriebswägung bestimmt. Für diese Berechnung wurde das Trocken-, Nass- und Auftriebsgewicht der jeweiligen Probe ermittelt. Die Messungen wurden an Gesteinswürfeln mit 65 mm Kantenlänge durchgeführt.

Die Durchführung der Analysen erfolgte an einer Waage mit Unterflurwägeeinrichtung, an der ein frei herabhängender Korb befestigt wurde und als Probenhalterung diente. Die Probenwürfel wurden zuvor im Trockenschrank bei ca. 30°C gelagert.

Zur Ermittlung des Nass- und Auftriebsgewichts mussten die Proben vorab mit Wasser vollständig gesättigt werden. Die Gesteinswürfel wurden dafür in einem Exikator mehrere Stunden evakuiert und anschließend mit Wasser geflutet. An diesen wassergesättigten Probenwürfeln wurde unter Auftrieb im Wasserbad das Auftriebsgewicht ermittelt.

Ein weiteres Mal wurden diese zur Ermittlung des Nassgewicht herangezogen. Für diese Gewichtsbestimmung mußte das überschüssige Wasser an der Oberfläche der Marmorproben abgenommen werden, da dadurch ein zu hohes Gewicht gemessen und damit eine erhöhte Porosität resultieren würde.

Aus den Gewichtsdaten dieser drei Messungen konnte im folgenden die Porosität [%] und die Matrixdichte [ $\text{gcm}^{-3}$ ] ermittelt werden.

Die Porosität ergibt sich aus der Beziehung:

$$P = \frac{m_n - m_t}{m_n - m_{\text{au}}} * 100$$

$m_n$  = Nassgewicht [g]

$m_t$  = Trockengewicht [g]

$m_{\text{au}}$  = Auftriebsgewicht [g]

Die **Porenradienverteilung** gibt den Anteil unterschiedlicher Porengrößen (Porenklassen) am Porenvolumen eines Gesteins wieder.

Die Ergebnisse dieser Messung erlauben Aussagen über den Verwitterungszustand eines Mamors. Physikalische Verwitterungsmechanismen führen zu einer initialen Gefügauflockerung (Risswachstum an Korngrenzen), in Verbindung mit zunehmend größeren Porenradien.

Die Verteilung der Porenradien wurde mittels Quecksilberporosimetrie bestimmt. Die Proben befinden sich dabei in einem Behälter, der mit Quecksilber gefüllt ist. Gemessen wird der Druck, der aufgebracht werden muss, um das Quecksilber in die Poren zu pressen. Da jedem Radius ein bestimmter Druck zugeordnet werden kann, erlaubt das hineingepresste Quecksilbervolumen die Berechnung der Porenradienverteilung (vgl. FITZNER & BASTEN, 1994).

Die Messung der Porenradienverteilung erfolgte an der GH Kassel, Fachgebiet Baustoffkunde und wurde von Dr. B. Middendorf durchgeführt.

Die **kapillare Wasseraufnahme** gibt an, welche Menge Wasser pro Flächeneinheit in Abhängigkeit von der Zeit vom Gestein kapillar aufgenommen wird. Steht ein poröser Naturstein im Kontakt mit flüssigem Wasser, kommt es zur freiwilligen Wasseraufnahme. Dieses Phänomen wird durch die Kapillargesetze beschrieben.

Kapillares Saugen findet bei Gesteinen im Porenbereich von 0,1  $\mu\text{m}$  und 1 mm Durchmesser statt, die nach KLOPFER (1985) auch als Kapillarporen bezeichnet werden (vgl. Abb. 6).

Im Bereich  $< 0,1 \mu\text{m}$  wird Wasser nur durch Kapillarkondensation oder Oberflächen- und Lösungsdiffusion in die Mikroporen aufgenommen. Im Bereich  $> 1 \text{ mm}$  tauchen bereits Strömungserscheinungen auf. Poren dieses Durchmessers werden als Makroporen bezeichnet.

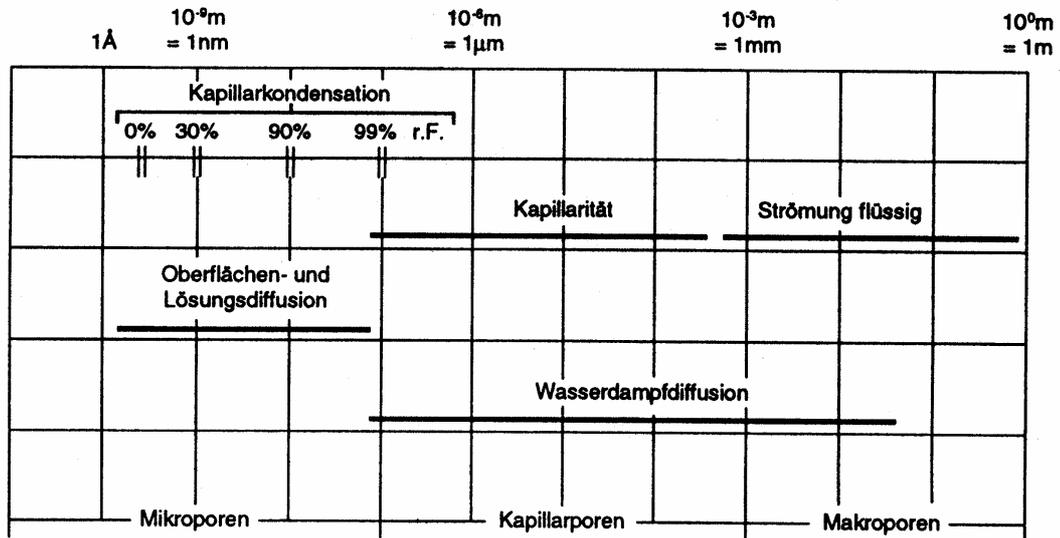


Abb. 6: Wassertransportmechanismen in Abhängigkeit von der Porengröße, nach KLOPFER (1985); aus POSCHLOD (1990).

Der bei diesem Verfahren ermittelte  $w$ -Wert dient zur Beschreibung der kapillaren Saugkraft des Gesteins. Er gibt an, welche Menge Wasser pro Flächeneinheit und Quadratwurzel der Zeit vom Gestein kapillar aufgenommen wurde (Abb. 7).

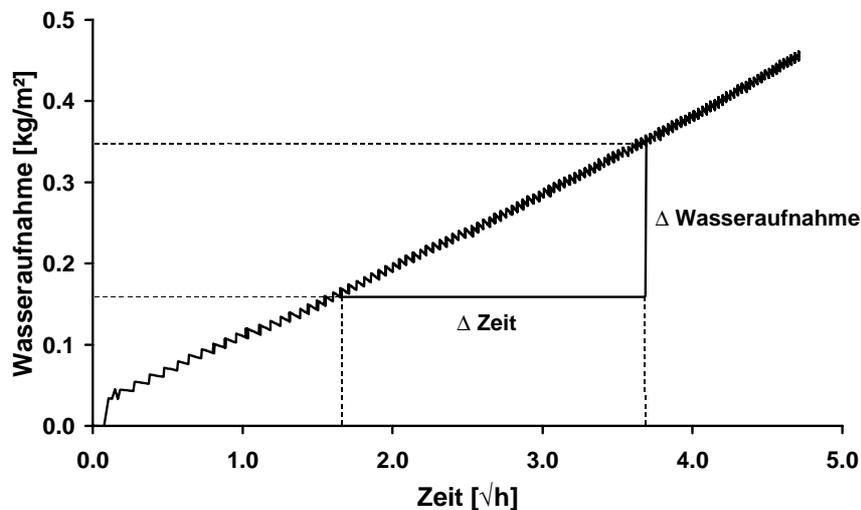


Abb. 7: Berechnung der  $w$ -Wertes am Beispiel der Probe 32 in X-Richtung.

Die Messung der kapillaren Wasseraufnahme erfolgte an einer Wägevorrichtung mit Unterflurwägeeinrichtung (vgl. Auftriebswägung) (Abb. 8) in einem thermokonstanten Raum (Temperatur 20 °C, rel. Luftfeuchtigkeit  $\approx$  45 %).



Abb. 8:

Wägevorrichtung zur Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme.

Der trockene Probenwürfel, mit einer Kantenlänge von ca. 65 mm, wurde während der Messung mit seiner Unterkante ca. 1 cm in ein mit Wasser gefülltes Becken getaucht.

Die Menge des kapillar aufgenommene Wasser wurde in Intervallen von 20 Sekunden von einer Waage bestimmt und direkt von einem Rechner erfasst. Die Messdauer betrug insgesamt ca. 24 Stunden.

Bei dieser Methode kann es zu einer hohen Messgenauigkeit kommen, da die Waage sehr empfindlich auf Temperatur- und Luftdruckschwankungen reagiert. Weiterhin ist z.B. die Sinkgeschwindigkeit, die zur Ermittlung des  $w$ -Wertes herangezogen wurde, nicht genau messbar. Ebenso ist die sehr geringe Wasseraufnahme von Marmor sehr nachteilig.

#### **4.7 Thermische Dilatation**

Die Ermittlung der thermischen Dehnungsverhalten erfolgte mittels eines Dilatometers. Das Grundprinzip eines Dilatometers ist in Abb. 9 dargestellt.

Neben der thermische Dehnung wurde die bleibende Restdehnung ( $\rightarrow$  Schädigung) ermittelt. Die Längenänderung der Probenprismen (10 x 10 x 50 mm) in Richtung der Längsachse ( $\Delta l$ ) wurde mittels induktiver Wegaufnehmer mit einer Auflösung von 1  $\mu$ m bestimmt, die an einem Referenzrahmen aus Quarzglas befestigt sind.

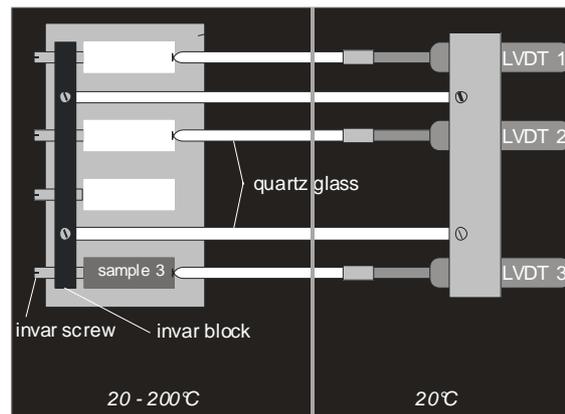


Abb. 9: Schematische Darstellung des Dilatometers, nach WIDHALM et al. (1996). Die Längenänderung der Proben wird mittels induktiver Wegaufnehmer (LVDT) bestimmt.

Es wurden von jedem Gestein sechs Proben, parallel zu den drei Hauptgefügekoordinaten und jeweils drei weitere Proben parallel zu den Winkelhalbierenden (XY, XZ, YZ) gemessen (Abb. 10).

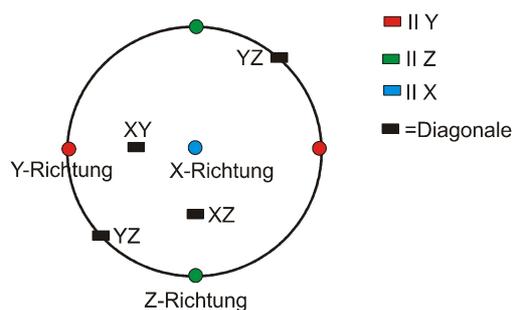


Abb. 10:  
Stereographische Projektion der  
Probenorientierung.

Die Starttemperatur lag bei 20°C. Es folgten zwei Abkühlungs- und zwei Aufheizungszyklen, wobei die Kühlphase eine Temperatur von -20°C und die Heizphase eine Temperatur von 90°C erreichte.

Um eine ständige Äquilibriumierung der Proben zu gewährleisten, wurde eine Heizrate von 1°C / min gewählt. Die Proben befanden sich während der Messung in einer verschließbaren Kammer, die durch einen Thermostaten temperiert wurde. Die Homogenisierung der Temperatur wurde durch einen vortemperierten Luftstrom erzeugt. Die parallele Messung von sechs Proben dauert bei der angegebenen Versuchsdurchführung ca. 23 Stunden.

Die Darstellung der Dilatationsdaten erfolgt durch Auftragung der Dehnung ( $\epsilon$ ) in mm/m gegen die Temperatur. Die Restdehnung sowie die Ausdehnungskoeffizienten ( $\alpha$ ) sind in Tabellen bzw. Diagrammen dargestellt. Der Ausdehnungskoeffizient ( $\alpha$ ) wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\alpha = \Delta l \text{ [m]} / (\text{Probenlänge [m]} * \Delta T \text{ [}^\circ\text{C]})$$

## 5. Ergebnisse

### 5.1 Gefügekundliche und petrographische Eigenschaften

#### 5.1.1 Mikrogefüge

Mittels konventioneller Durchlichtmikroskopie wurden vorab die petrographischen und mikrogefügekundlichen Eigenschaften der Marmore erfasst. Weiterhin hatte diese Untersuchung zum Ziel, das Ausmaß der Verwitterung anhand von Gefügeentfestigung zu charakterisieren. Für beide Proben konnte als Hauptgemengteil Calcit ermittelt werden. Im folgenden werden die beiden Marmortypen genauer charakterisiert.

**Probe 32:** Dieses Gestein stellt einen klein- bis mittelkörnigen Calcitmarmor mit dünnen dolomitischen Lagen dar. Das Gefüge wird überwiegend von polygonalen bis interlobaten Kornformen sowie von geschwungenen bis gezahnten Korngrenzengeometrien bestimmt.

Wie oben erwähnt, weist diese Probe einen bimodalen Mineralgehalt auf. Überwiegend sind klein- bis mittelkörnige (0,8-1,3 mm) Calcitkristalle (s. Tafel 3, Bild 1) zu erkennen. Der Dolomit zeigt dagegen ein feinkörniges Gefüge (0,1-0,2 mm) (s. Tafel, Bild 2). Daneben kommt feinkörniger Quarz als akzessorisches Gemengteil vor.

Die Calcitkristalle haben eine equigranular – polygonale / interlobate Kornform. Die Korngrenzengeometrie ist überwiegend geschwungen, die lokal jedoch auch buchtig bis gezahnt erscheint (s. Tafel 3, Bild 3). Vereinzelt sind geöffnete Spaltflächen zu beobachten. Nur selten treten Zwillingslamellen (s. Tafel 3, Bild 4) auf, deren Breite maximal 0,05 mm erreicht. Die Lamellen sind korndurchsetzend und ihr Verlauf ist gerade. Diese Ausbildung der Zwillingslamellen ist ein Hinweis darauf, dass keine post- metamorphe Deformation stattgefunden hat (vgl. PASSCHIER & TROUW, 1996). Eine bevorzugte Orientierung von Korngrenzen oder Spaltflächen konnte nicht beobachtet werden.

Der Dolomit tritt in Lagen bzw. Domänen auf, welche eine Mächtigkeit von 0,3 – 3 mm erreichen. Die Körner des Dolomits sind durch equigranulare – interlobate Gestalt gekennzeichnet. Innerhalb der Dolomitkristalle sind Fluideinschlüsse, sowie nicht näher definierbare Mineraleinschlüsse zu erkennen. Weitere Internstrukturen konnten nicht beobachtet werden.

Die Kathodolumineszenz-Mikroskopie (KLM) wurde an den Marmorproben eingesetzt, um vor allem bei der Probe 32, die zwei Karbonatphasen (Calcit/Dolomit) durch ihr unterschiedliches Lumineszenzverhalten sichtbar zu machen (s. Tafel 4, Bild 1). Die Intensität der Lumineszenz wird bei Karbonaten vorwiegend durch das Mn/Fe- Verhältnis kontrolliert (GROSS et al., 1999).  $Mn^{2+}$  wirkt als Aktivator und erhöht die Lumineszenz, wogegen  $Fe^{2+}$  als Dämpfer wirkt. Die Ergebnisse der RFA zeigen, dass die Probe 32 Mangan enthält (siehe Kapitel 5.1.3).

Der klein- bis mittelkörnige Calcit besitzt dunkelbraune KL-Farben. Die KL-Farbe ist nicht in allen Kristallen homogen verteilt, sondern zeigt z.T. einen Zonarbau (s. Tafel 4, Bild 1). Dies könnte auf eine Alteration der Korngrenzen hinweisen, die aufgrund des Durchganges einer fluiden Phase entstanden ist. Der feinkörnige Dolomit hat, im Gegensatz zum Calcit, eine intensiv leuchtende rote KL-Farbe.

Im Kontakt der feinkörnigen Dolomitlagen und -linsen mit den calcitischen Bereichen tritt z.T. eine weinrote-braune Lumineszenz der Kristalle auf. Innerhalb der Dolomitlagen selbst, treten zusätzlich vereinzelt tiefblaue lumineszierende Mineralphasen auf, bei denen es sich vermutlich um Tonminerale handelt. Sie sind in sehr gering mächtigen Lagen vorhanden.

Die Korngrenzen des Marmors sind größtenteils deutlich durch rot bis rot-braune KL nachgezeichnet.

Innerhalb des feinkörnigen dolomitischen Bereiches sind lokal ebenfalls dunklere KL-Farben zu beobachten, welche typisch für den Calcit dieses Marmors sind. Damit handelt es sich nicht um reine dolomitische Bereiche, sondern vielmehr um Verwachsungen von Dolomit und Calcit, wobei ersterer dominiert.

**Probe 68:** Diese Gesteinsprobe stellt einen mittel- bis grobkörnige, homogenen Calcitmarmor dar. Das Gefüge zeichnet sich durch polygonale Kornformen mit überwiegend geraden Korngrenzen aus.

Die Calcitkristalle weisen eine mittel- bis grobkörnige (1,4–4,0 mm) Korngröße auf. Die Kornform ist equigranular-polygonal, wobei die Korngrenzen überwiegend gerade und nur z.T. geschwungen sind (s. Tafel 3, Bild 5). Im Dünnschliff ist deutlich erkennbar, dass die Korngrenzen geöffnet sind (s. Tafel 3, Bild 6).

Diese Kristallgrenzen stellen mechanische Diskontinuitäten dar, an denen das Gestein entfestigt (Abb. 11).

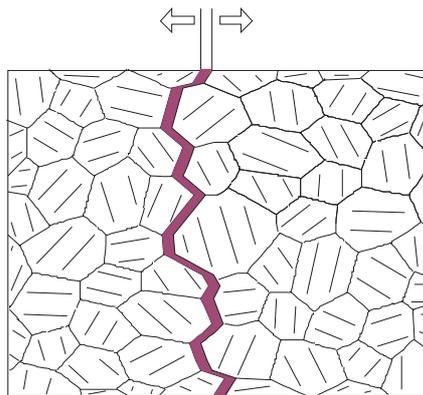
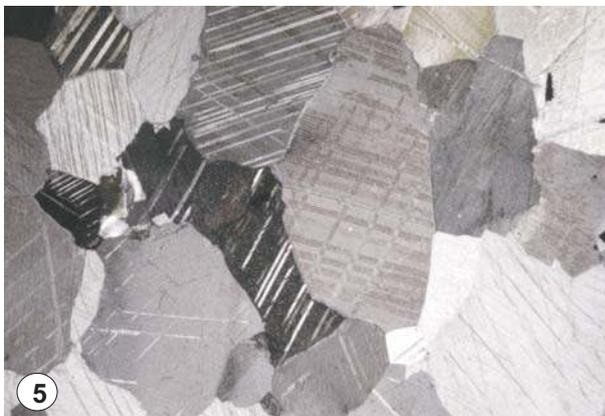
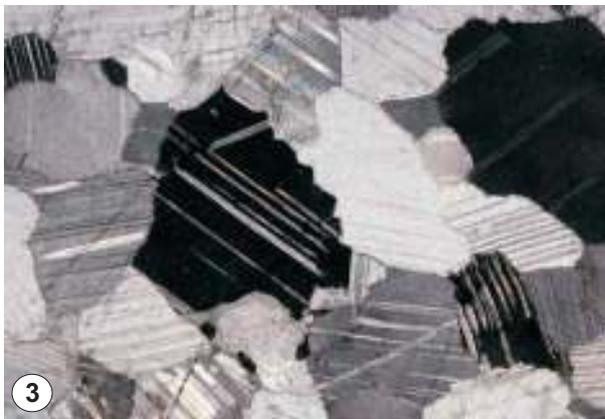


Abb. 11: Schematische Darstellung der bevorzugte Rissbildung an equilibrierten Korngrenzen.

Weiterhin konnten nur selten geöffnete Spaltflächen beobachtet werden. Ebenfalls kommen nur selten Zwillingslamellen vor. Beide intrakristallinen Gefüge weisen keine bevorzugte Orientierung auf. Inhomogenitäten, wie in Probe 32 der Dolomit, wurden in dieser Probe nicht beobachtet.

Nach KLM-Untersuchungen zeigt Probe 68 nur eine schwache blau-violette KL-Farbe (s. Tafel 4, Bild 3). Diese ist innerhalb der Kristalle sowie zwischen den einzelnen Körnern homogen. Lediglich an den Korngrenzen und geöffneten Spaltflächen weist die blau-violette KL-Farbe eine höhere Intensität auf. Die nur schwache blau-violette KL-Farbe ist typisch für Cacit mit geringen Mn-Gehalten (GROSS et al., 1999). Dies korreliert mit den Daten der RFA (vgl. Kapitel 5.1.3).

### Tafel 3: Mikrogefüge



**Abb. 1:** Übersichtsbild: Probe 32, fein- bis mittelkörniger Calcit; XZ-Fläche, Bildbreit 5,3 mm.

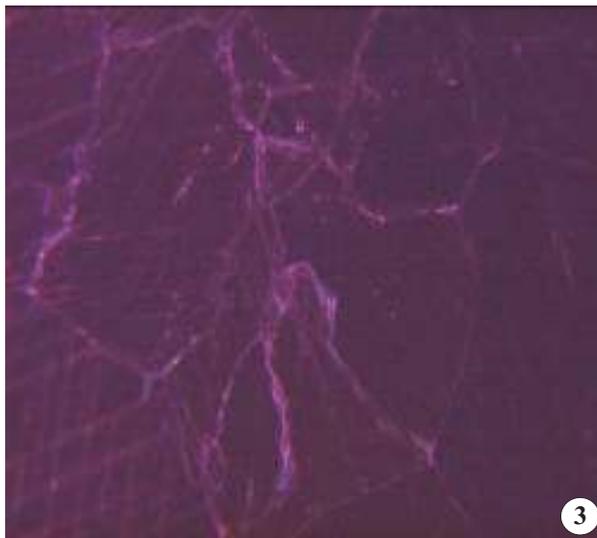
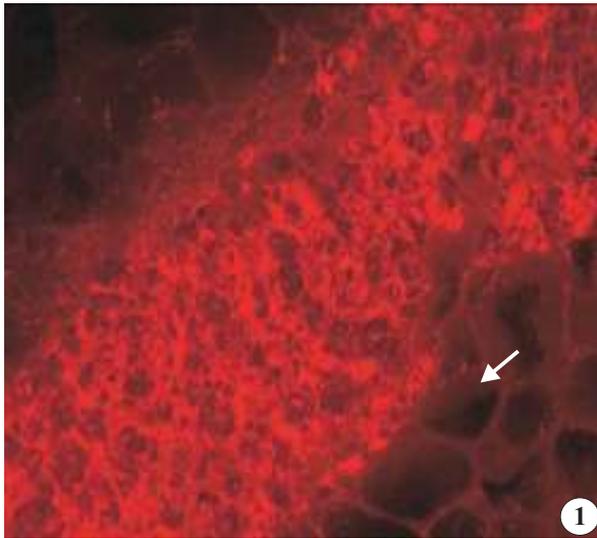
**Abb. 2:** Übersichtsbild: Probe 32, lagenartig angeordneter, feinkörniger Dolomit; XZ-Fläche, Bildbreite 5,3 mm.

**Abb. 3:** Probe 32, Calcit mit buchtigen bis gezahnte Korngrenzen; XZ-Fläche, Bildbreite 2,76 mm.

**Abb. 4:** Probe 32, gerade Zwillingslamellen; YZ-Fläche, Bildbreite 0,69 mm.

**Abb. 5:** Übersichtsbild: Probe 68, mittel- bis grobkörniger Calcit; YZ-Fläche, Bildbreite 5,3 mm.

**Abb. 6:** Probe 68, geöffnete Korngrenzen; YZ-Fläche, Bildbreite 0,69 mm.

**Tafel 4: KL-Mikroskopie**

**Abb. 1:** Probe 32, Dolomit mit intensiv roten KL-Farben, Calcit mit dunkel-braunen KL-Farben und Zonarbau (Pfeil); KL-Mikroskopie, Bildbreite 1,6 mm.

**Abb. 2:** Probe 32, mittelkörniger Calcit mit feinkörnigen Dolomitlagen, gleicher Ausschnitt wie Abb. 1; Durchlicht + Pol.

**Abb. 3:** Probe 68, Calcit mit dunkel-violetter KL-Farbe, Korngrenzen zeigen intensivere violette KL-Farben; KL-Mikroskopie, Bildbreite 0,65 mm.

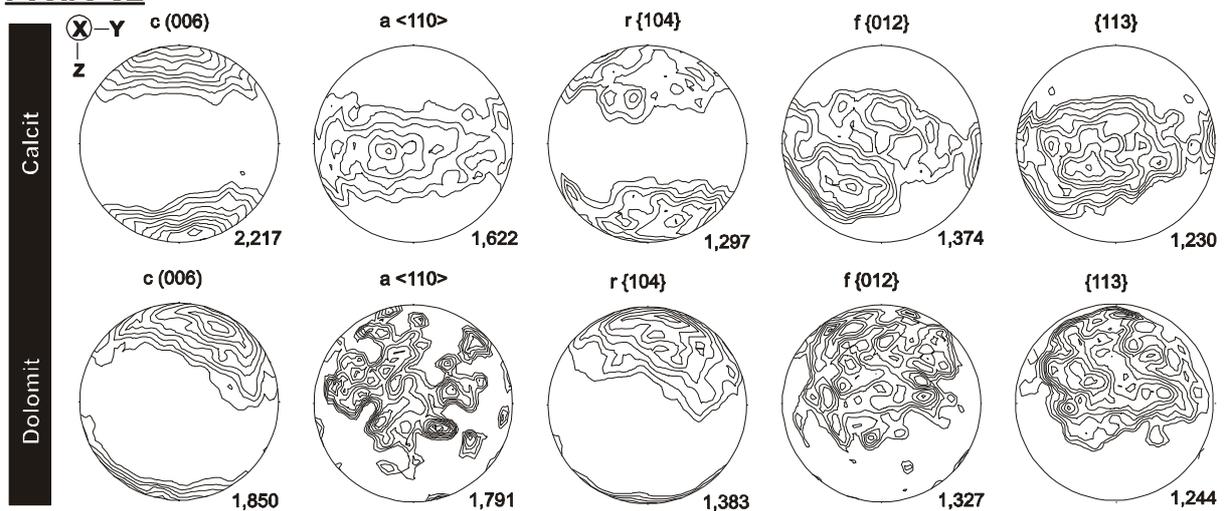
**Abb. 4:** Probe 68, grobkörniger Calcit, gleicher Ausschnitt wie Abb. 3; Durchlicht + Pol

### 5.1.2 Textur

Beide untersuchten Marmorproben weisen eine deutliche kristallographische Vorzugsorientierung auf (Abb. 12).

Die grundlegenden natürlichen Texturtypen von Calcit und Dolomit können vereinfacht als um die c- bzw. a- Achse rotierende Einkristalle (c- Achsen- und a- Achsenfasertyp) oder als Überlappung dieser beiden Typen beschrieben werden (LEISS & ULLEMEYER, 1999). Bei der Auswertung werden deswegen die Polpunkte zur (006)-Fläche und die  $\langle 110 \rangle$ -Achse (c- und a- Achse) bestimmt, sowie andere mechanische Spaltflächen, die bei der Verwitterung aktiviert werden können. Dazu gehören die {104}-Fläche (= r-Fläche), die {012}-Fläche (= f-Fläche). Weiterhin können die {113}- und {018}-Fläche (= e-Fläche) bestimmt werden. An den e-Flächen bilden sich im Calcit bevorzugt Zwillinge aus.

#### Probe 32



#### Probe 68

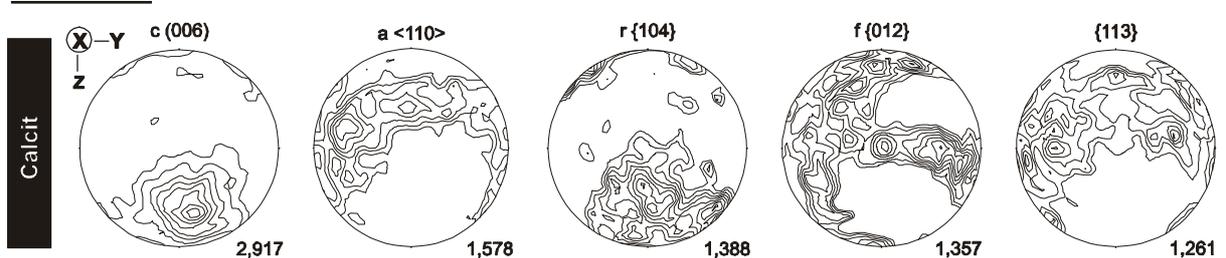


Abb. 12: Texturen der Proben 32 und 68 (Schmidt'sches Netz, untere Halbkugel, Isolinien entsprechen dem Vielfachen der Gleichverteilung; das Intensitätsmaximum ist unten rechts vermerkt).

Die Textur der beiden Proben kann als c-Achsenfasertyp beschrieben werden. Die c-Achsen weisen dabei ein Punktmaximum auf, während die a-Achsen eine Gürtelverteilung zeigt, die für Probe 32  $\pm$  parallel zur Foliationsfläche verläuft. Das c-Achsenmaximum liegt senkrecht zur Foliation. Aber nicht nur der Fasertyp charakterisiert die Textur, sondern auch die Intensität und die Orientierung in Hinblick auf andere Strukturelemente, wie z.B. die Foliation.

Da bei der Präparation der Probe 68, aufgrund fehlender makroskopischer Merkmale, nicht genau senkrecht zur Foliation gearbeitet wurde, liegt die c-Achsenverteilung nicht axialsymmetrisch, sondern etwas versetzt. Dementsprechend sind auch die  $\langle 110 \rangle$ - und (104)-Kleinkreise asymmetrisch verteilt. Auffällig ist, dass der Dolomit in Probe 32 eine Abweichung zur Calcit-Textur zeigt.

Eine Anomalie tritt weiterhin bei der Calcit-Textur der Probe 32 auf. Die Gürtelverteilung der a-Achsen weist ein leichtes Punktmaximum auf.

Die Intensitätswerte der c-Achsen variieren von 1,85 mrd (Dolomit) und maximal 2,92 mrd beim Calcit. Ein Marmor mit einer sehr starken Textur kann im Vergleich ein c-Achsenmaximum von 4,0 mrd aufweisen (vgl. WEISS et al., 1999).

### 5.1.3 Röntgendiffraktometeraufnahme / Röntgenfluoreszenzanalyse

Die mineralogischen Untersuchungen der RDA und RFA haben gezeigt, dass es sich bei beiden Proben um Calcitmarmore handelt.

Die bei der RDA gemessenen Reflexe können vorwiegend dem Calcit zugeordnet werden (Anhang I-II). Eine Ausnahme stellt die Probe 32.2 dar. Hier konnte zusätzlich Dolomit nachgewiesen werden. Da bei einer weiteren Messung der Probe 32 nur Calcit festgestellt wurde, liegt die Vermutung nahe, dass der Dolomit nicht homogen verteilt, sondern auf bestimmte Bereiche begrenzt ist.

Die Ergebnisse der RDA wurden durch die qualitative Analyse der RFA bestätigt. Der CaO-Gehalt liegt bei allen vier Proben über 53 % (Tab. 1). Auch hier weist die Probe 32.2 leicht erhöhte MgO-Werte (1,87 %) auf, die auf das Vorhandensein von Dolomit ( $\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$ ) hinweisen. Die Probe 32.1 hat im Gegensatz zu den 68iger Proben auch leicht erhöhte MgO-Werte von 0,69 %. Dies könnte bedeuten, dass auch dort Dolomit enthalten ist.

Die Elemente, die weiterhin untersucht wurden, liegen im Konzentrationsbereich weit unter 0,1 %.

Tab. 1: Haupt- und Spurenelementgehalte der Proben, die mittels quantitativer Untersuchung der RFA bestimmt wurden.

Probennummer:	<b>32.1</b>	<b>32.2</b>	<b>68 ohne Riss</b>	<b>68 mit Riss</b>
<b>SiO<sub>2</sub>[%]</b>	n.d.*	n.d.	n.d.	n.d.
<b>TiO<sub>2</sub>[%]</b>	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[%]</b>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>[%]</b>	0,05	0,05	0,07	0,09
<b>MnO[%]</b>	n.d.	0,01	n.d.	n.d.
<b>MgO[%]</b>	0,69	1,87	0,18	0,17
<b>CaO[%]</b>	55,10	53,60	55,60	55,70
<b>Na<sub>2</sub>O[%]</b>	0,07	0,05	0,06	0,04
<b>K<sub>2</sub>O[%]</b>	0,02	0,02	0,01	0,01
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>[%]</b>	0,01	0,01	0,01	0,01
<b>Sum[%]</b>	<b>56,00</b>	<b>55,62</b>	<b>55,92</b>	<b>56,00</b>

\* not detected

Probennummer:	<b>32.1</b>	<b>32.2</b>	<b>68 ohne Riss</b>	<b>68 mit Riss</b>
<b>Nb[ppm]</b>	1	n.d.	2	n.d.
<b>Zr[ppm]</b>	7	5	7	7
<b>Y[ppm]</b>	1	1	1	n.d.
<b>Sr[ppm]</b>	112	101	94	92
<b>Rb[ppm]</b>	3	3	4	2
<b>Pb[ppm]</b>	3	3	7	4
<b>Ga[ppm]</b>	2	n.d.	n.d.	n.d.
<b>Zn[ppm]</b>	1	2	2	5
<b>Cu[ppm]</b>	5	n.d.	n.d.	n.d.
<b>Ni[ppm]</b>	7	5	4	3
<b>Co[ppm]</b>	n.d.	2	n.d.	3
<b>Cr[ppm]</b>	7	7	7	6
<b>V[ppm]</b>	7	3	5	8
<b>Ba[ppm]</b>	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.

\* not detected

Der Marmor ( $\text{CaCO}_3$ ) besteht, wie die Formel auch zeigt, neben Calciumoxid auch aus Kohlendioxid. Die Summe der gemessenen Elemente weist daher auch nur 55 % auf, da Kohlendioxid durch das RFA-Verfahren nicht erfasst wird.

Nach RÖSLER (1991) besteht ein Calcit rein rechnerisch aus 56,03 Gew. % CaO (s. Tab. 1) und 43,97 Gew. %  $\text{CO}_2$ . Ein reiner Dolomit weist dagegen einen theoretischen Chemismus von 30,41 Gew. % CaO, 21,86 Gew. % MgO und 47,73 Gew. %  $\text{CO}_2$  auf.

## 5.2 Petrophysikalische Eigenschaften

### 5.2.1 Porosität / Porenradienverteilung

Die Porosität ist ein wichtiger Indikator zur Beschreibung der Gefügeentfestigung und damit auch für den Verwitterungsgrad von Marmor. Dabei wird zwischen primärer und sekundärer Porosität unterschieden. Nach FITZNER & BASTEN (1994) ist die primäre Porosität das Ergebnis des eigentlichen Gesteinsbildungsprozesses. Alle weiteren Porositätsveränderungen werden durch die sekundäre Porosität beschrieben. Die Verwitterungsporosität stellt dabei einen Sonderfall der sekundären Porosität dar. Bei Marmoren handelt es sich um eine sekundäre Porosität bzw. eine inter- / intragranulare Rissporosität.

Die (Gesamt-) Porosität ist bei frischen Marmoren zumeist geringer als 0,4 Vol. % (vgl. RUEDRICH et al., 2001). Dadurch wird die Festigkeit des Gesteins jedoch kaum gemindert. Dagegen kann die Porosität bei Marmoren, die durch Verwitterung entfestigt sind, durch die Gefügauflockerung erheblich ansteigen und in Extremfällen 3-4 Vol. % erreichen, so dass die Gesteinsfestigkeit stark herabgesetzt ist und die verwitternde Wirksamkeit des Wasser im Porenraum beträchtlich erhöht wird (GRIMM, 1999). Ein verwitterter Marmor muss jedoch nicht zwangsläufig eine höhere Porosität aufweisen; ein verwitterter Kauffunger Marmor zeigt z.B. eine durchschnittliche Porosität von 0,29 Vol. % (vgl. RUEDRICH et al., 2001).

Für Probe 32 und Probe 68 wurde mittels der Auftriebswägung eine Porosität von 0,25 % gemessen (Tab. 2). Bei der Probe 68 wurde im Vorfeld eine höhere Porosität erwartet, da bei der Dünnschliffmikroskopie dieses Marmors eine deutliche Entfestigung an den Korngrenzen festgestellt wurde.

Tab. 2: Gemessene Gewichte und errechnete Gesteinsdaten, die zur Charakterisierung des Porenraumes dienen.

Probe	$m_t$ [g]	$m_{au}$ [g]	$m_n$ [g]	Porenvolumen [ml]	Porosität [%]	Rohdichte [ $g\ cm^{-3}$ ]	Matrixdichte [ $g\ cm^{-3}$ ]
32	782,91	495,35	783,63	0,72	0,25	2,72	2,723
68	793,17	501,11	793,89	0,72	0,25	2,71	2,716

Besondere Aufmerksamkeit gilt den Ergebnissen der Porenradienverteilung. Die Porengrößenverteilung beeinflusst nicht nur die Durchlässigkeit (Permeabilität) gegenüber Flüssigkeiten und Gasen, sondern auch den Ablauf der Eis- und Salzkristallisation im Porenraum und deren gefügesprengende Wirksamkeit (WEISS, 1992).

Bei frischen Marmoren überwiegen Mikroporen und feine Kapillarporen; verwitterte Marmore mit gelockertem Gefüge weisen zunehmend grobe Kapillarporen auf (GRIMM, 1999).

Die Porenradienverteilung wurde jeweils an thermisch beanspruchten (bei 90°C) und unbehandelten Proben durchgeführt. Beide thermisch behandelten Proben zeigen im Bereich zwischen 0,03  $\mu m$  und 1,0  $\mu m$  ein Maximum der Porengröße.

In Abb. 13 ist die Porenradienverteilung der Marmorproben dargestellt. Dort ist zu erkennen, dass sich bei den thermisch beanspruchten Proben die Poren geweitet haben, und dass dadurch mehr Quecksilber in die Poren hineingepresst werden konnte. Die Poren mit einem Radius von  $> 1\ \mu m$ , die mit diesem Verfahren nachgewiesen worden sind, sind für Marmore jedoch unrealistisch. Diese Poren entstehen während der Präparation an der Oberfläche der Proben und täuschen daher größere Porenradien vor.

Die unbehandelte Probe 68 hat ein Porenradiusmaximum im Bereich von 0,4 – 0,8  $\mu m$ . Neben diesen Kapillarporen, wurden auch Poren mit einem Radius von unter 0,1  $\mu m$  (Mikroporen) nachgewiesen. Nach der thermischen Beanspruchung ist das Maximum der Porenradien deutlich auf 0,6 – 1  $\mu m$  angestiegen. Es können keine Mikroporen mehr beobachtet werden. Diese Verlagerung der Porengrößenmaxima ist auch bei Probe 32 zu erkennen.

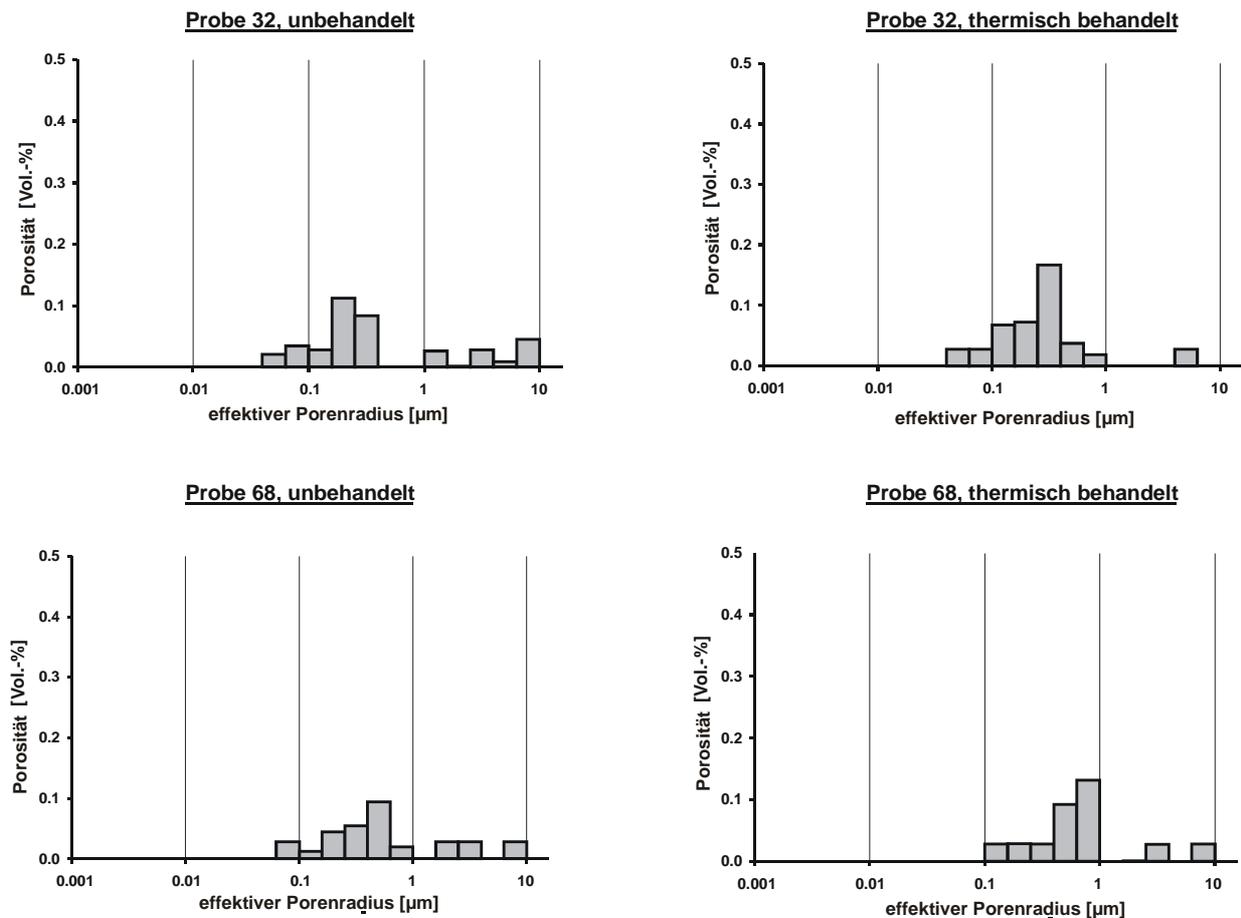


Abb. 13: Verteilung der Porenradien von unbehandelten und thermisch beanspruchten Proben.

Wahrscheinlich haben sich nach der thermischen Beanspruchung auch neue Poren gebildet (s. Anhang III+IV). Die neuen Poren sind durch neu entstandene Peaks dargestellt. Besonders im Radiusbereich von ca. 0,05 µm ist dieses Phänomen bei beiden Proben deutlich sichtbar.

Die Messergebnisse können jedoch verfälscht sein, da die sehr geringe Gesamtporosität des Marmors zu einer gerätebedingten Ungenauigkeit beiträgt.

Die Abb. 14 zeigt die Porenradienverteilung von einem frischen und einen verwitterten Carrara Marmor. Dieser Vergleich, von einem verwitterten mit einem frischen Marmor, soll zeigen, dass der Verwitterungsgrad eines Marmors deutlich von der Größe der Porenradien bestimmt wird.

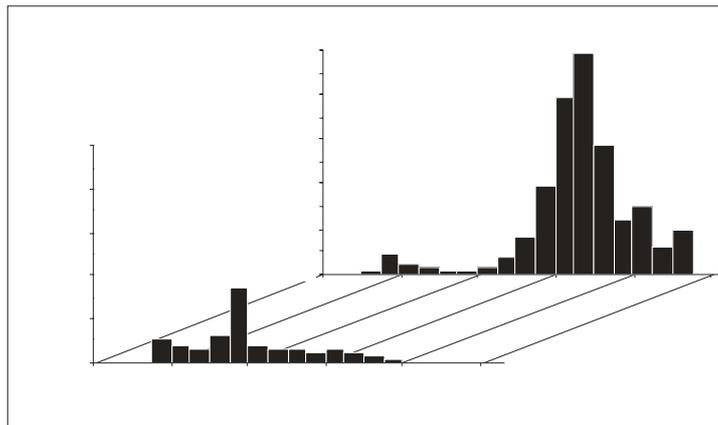


Abb. 14: Verteilung der Porenradien von (a) frischem und (b) verwittertem Carrara Marmor, aus RUEDRICH et al. (2001).

Die Diagramme zeigen, dass der frische Marmor eine höhere Porosität (0,51 %), als die in dieser Arbeit untersuchten Proben (0,25 %), hat, die Porenradien jedoch wesentlich kleiner sind. Beim Carrara Marmor liegt das Maximum der Porenradien im Bereich zwischen 0,032  $\mu\text{m}$  und 0,100  $\mu\text{m}$ . Der verwitterte Marmor hat ein signifikantes Maximum im Bereich von 0,560  $\mu\text{m}$  bis 5,600  $\mu\text{m}$  und damit überwiegend Kapillarporen. Neben den deutlich größeren Porenradien bei einem verwitterten als bei einem frischen Marmor, ist auch die Porosität des verwitterten Carrara Marmors (2,02 %) etwa 7x höher als bei den Marmorproben, die in der vorliegenden Arbeit untersucht wurden.

### 5.2.2 Kapillare Wasseraufnahme

Die Messung der kapillaren Wasseraufnahme wurde in drei orthogonalen Hauptrichtungen (X, Y, Z) durchgeführt. Diese Vorgehensweise zielte darauf ab, eine mögliche Richtungsabhängigkeit der kapillaren Wasseraufnahme zu erfassen.

Der bei diesem Verfahren ermittelte w-Wert dient zur Beschreibung der kapillaren Saugkraft eines Gesteins (Tab. 3). Für die Probe 32 wurde ein w-Wert von 0,08 bis 0,15  $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$  gemessen. Ein vergleichbarer Wert mit 0,11 bis 0,15  $\text{kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$  wurde für die Probe 68 ermittelt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Marmorproben ein annähernd isotropes Verhalten der kapillaren Wasseraufnahme aufweisen.

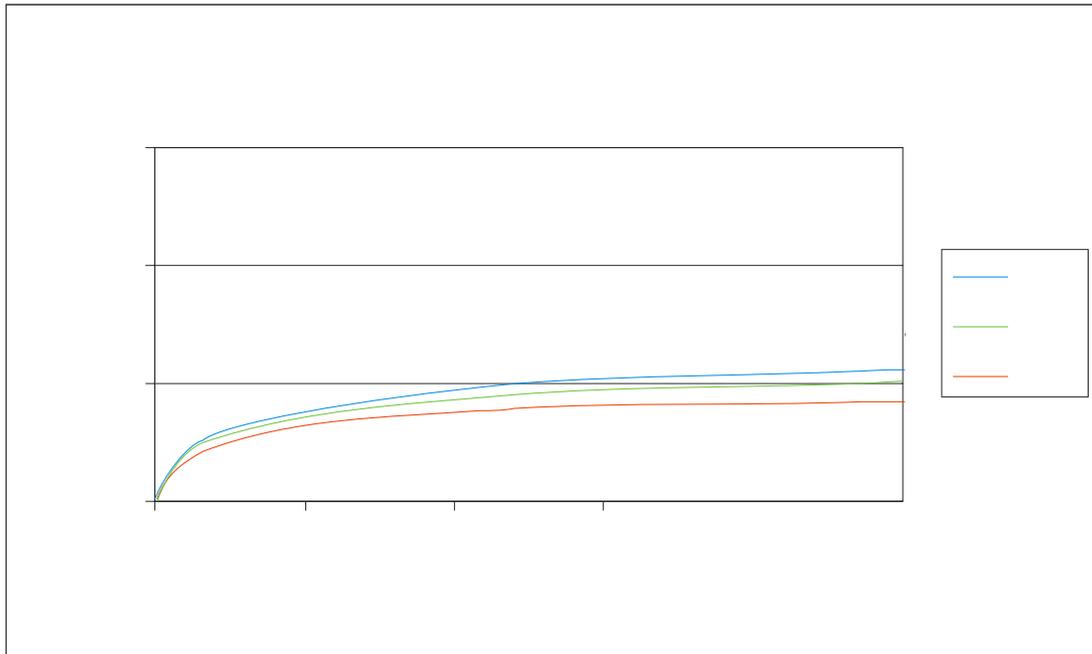
An diesen Ergebnissen ist deutlich zu erkennen, dass die Marmore aufgrund ihrer allgemein geringen Porosität und der geringen Porenradienverteilung nur sehr wenig Wasser kapillar aufnehmen können.

Tab. 3: Richtungsabhängigkeit der kapillaren Wasseraufnahme.

<b>Probe</b>	<b>Raumrichtung</b>	<b>Wasseraufnahmekoeffizient (w-Wert) [kg/m<sup>2</sup>√h]</b>
<b>32</b>	X	0,15
	Y	0,11
	Z	0,10
<b>68</b>	X	0,17
	Y	0,12
	Z	0,14

Die Diagramme (Abb. 15) zeigen deutlich, dass nur in der ersten Stunde Wasser aufgenommen wird. Danach kommt die Wasseraufnahme fast zum Stillstand, da der kapillare Sog die Oberkante des Probenwürfels erreicht und abreißt. Anhand der Porosität der beiden Marmore von 0,25 Vol. % und dem durchschnittlichen Probenwürfelvolumen von 287.5 cm<sup>3</sup> ergibt sich rechnerisch ein Maximum von ca. 0,72 g, welches der jeweilige Marmorwürfel an Wasser aufnehmen kann. Die Abbildung 15 zeigt, dass die beiden Proben etwa zwei Drittel der maximalen Wassermenge (ca. 0,55 g) aufgenommen haben.

a)



b)

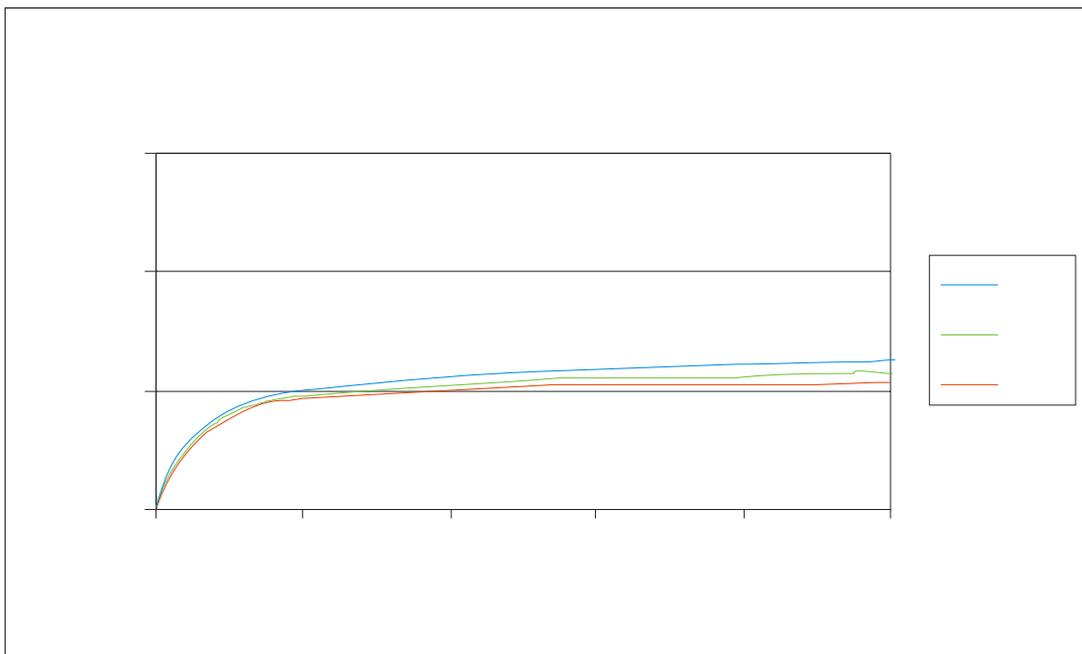
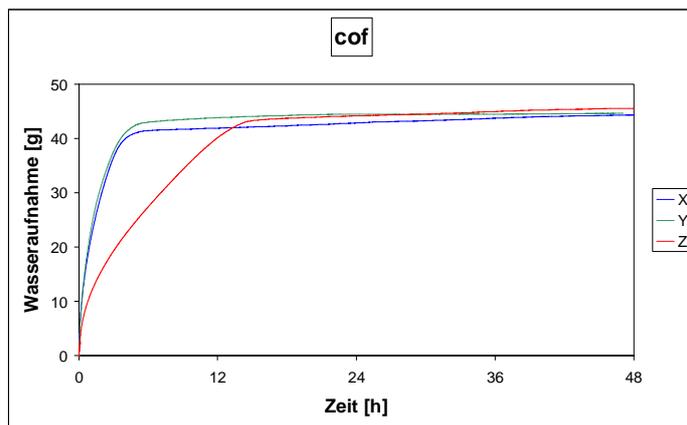


Abb. 15: Kapillare Wasseraufnahme in Abhängigkeit von der Raumrichtung, a) Probe 32, b) Probe 68.

Vergleicht man die Wasseraufnahmegeschwindigkeit der Marmore mit denen von Sandsteinen, so stellt man fest, dass ein schnell saugender Sandstein einen  $w$ -Wert bis  $45,0 \text{ kg/m}^2\sqrt{\text{h}}$  erreichen kann (KOCH & SIEGSMUND, 2001) (Abb. 16.a). Die Abbildung 16.a zeigt weiterhin deutlich, dass die kapillare Wasseraufnahme des Sandsteins richtungsabhängig ist. Es ist davon auszugehen, dass diese Richtungsabhängigkeit aus der Schichtung der Sandsteine resultiert, wobei die Vernetzung des Porensystems senkrecht zur Schichtung schwächer ausgeprägt ist als parallel zur Schichtung.

Die Unterschiede der kapillaren Wasseraufnahme von Marmoren und Sandsteinen ergibt sich aus der unterschiedlichen Ausbildung des Porenraumes. Ein Sandstein zeigt eine primäre Porosität (Abb. 16.b), wogegen ein Marmor eine Rissporosität aufweist, die aus der Verwitterung resultiert.

a)



b)



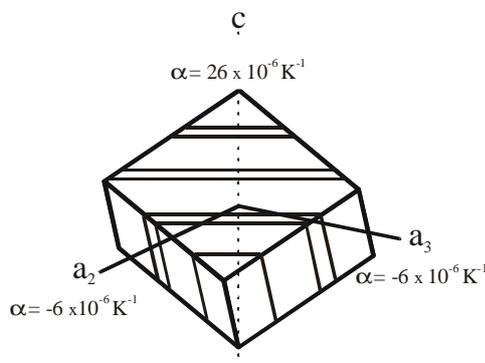
Abb. 16: a) Kapillare Wasseraufnahme vom Sandstein in Abhängigkeit von der Raumrichtung, b) Porenraumdarstellung eines Sandsteines, nach KOCH & SIEGSMUND (2001).

### 5.2.3 Thermische Dilatation

Thermische Dehnungsprozesse werden als initiale Verwitterungsmechanismus von Marmor angesehen (TSCHEGG et al., 1999).

Dabei kommt den extrem anisotropen Einkristall-Eigenschaften von Calcit eine entscheidende Bedeutung zu (EVANS, 1978; FREDRICH & WONG, 1986). So variiert der Koeffizient der thermischen Dilatation ( $\alpha$ ) von Calcit von positiven Werten ( $\alpha = 26 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) parallel zur kristallographischen c-Achse bis zu negativen Werten ( $\alpha = -6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) parallel zu den a-Achsen (KLEBER, 1959) (Abb. 17).

a)



b)

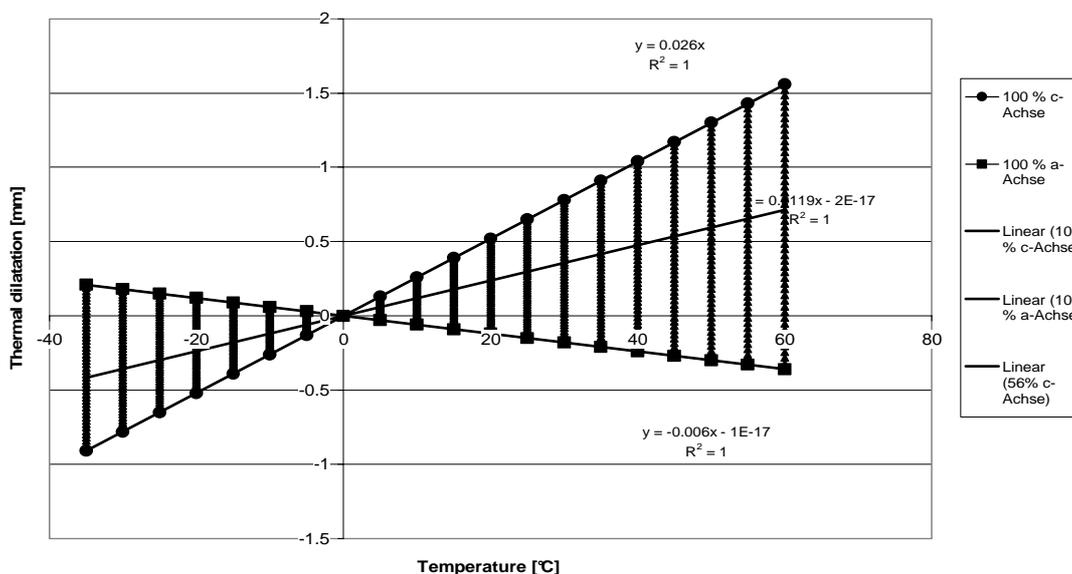


Abb. 17: a) Spaltrhomboeder mit den Werten für die thermische Dilatation, aus KLEBER (1959), b) möglicher thermischer Dehnungsbereich von Marmor.

Das bedeutet, dass der Calciteinkristall sich bei Erwärmung parallel zur c-Achse ausdehnt und parallel zu den a-Achsen eine Kontraktion stattfindet.

Durch diese Anisotropie der thermischen Dilatation können sich bei Temperaturwechsel Zug-, Druck- und Scherspannungen aufbauen, die zu einer Mikrorissbildung führen (BATTAGLIA et al., 1993; SIEGSMUND et al., 1997; WIDHALM et al., 1997). Diese Mikrorissbildung ist vor allem auf die geringen Kornbindungskräfte von Calcit zurückzuführen (GRIMM, 1999).

Das thermische Dehnungsverhalten der untersuchten Proben ist durch eine deutliche Richtungsabhängigkeit gekennzeichnet. Beide Proben zeigen in alle untersuchten Richtungen eine thermische Dehnung, die jedoch in den einzelnen Richtungen unterschiedlich ausgeprägt ist. In den Abbildungen 18 - 19 ist die experimentell bestimmte thermische Dilatation als Funktion der Temperatur dargestellt.

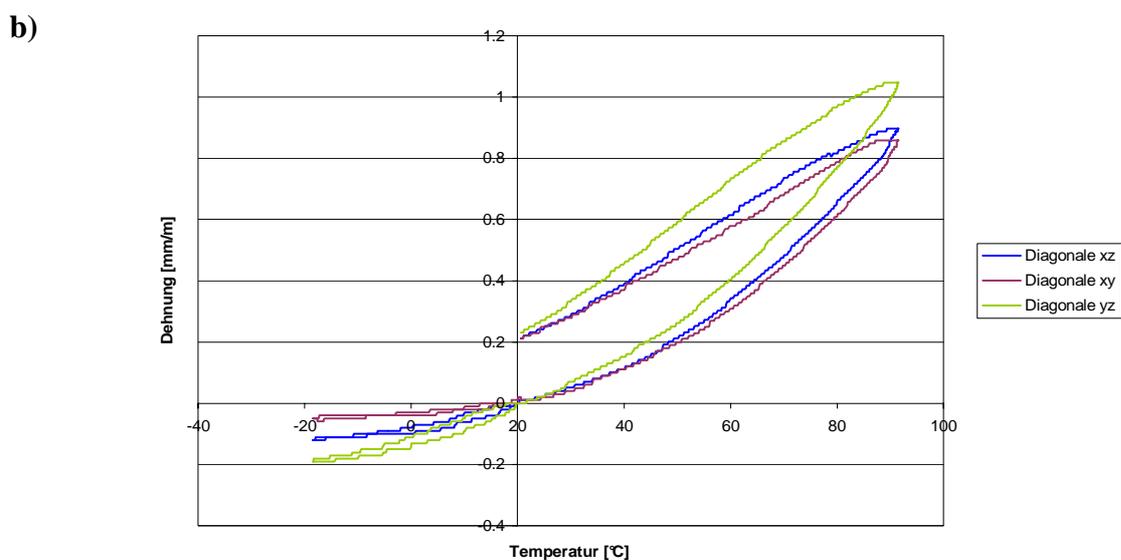
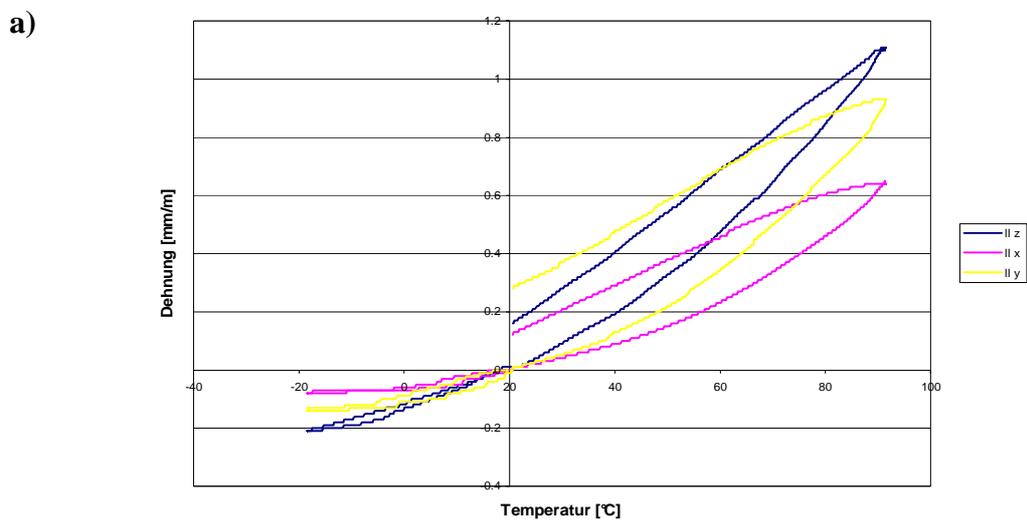
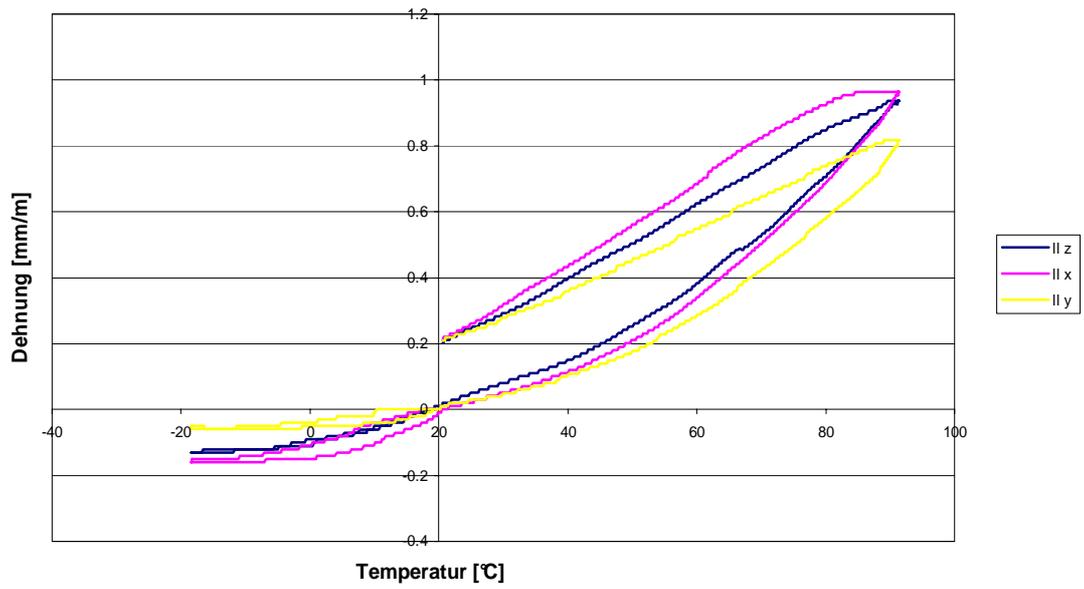


Abb. 18: Ergebnisse der thermischen Dilatation der Probe 32, a) parallel zu den drei Hauptgefügekoordinaten, b) parallel zu den drei Winkelhalbierenden.

a)



b)

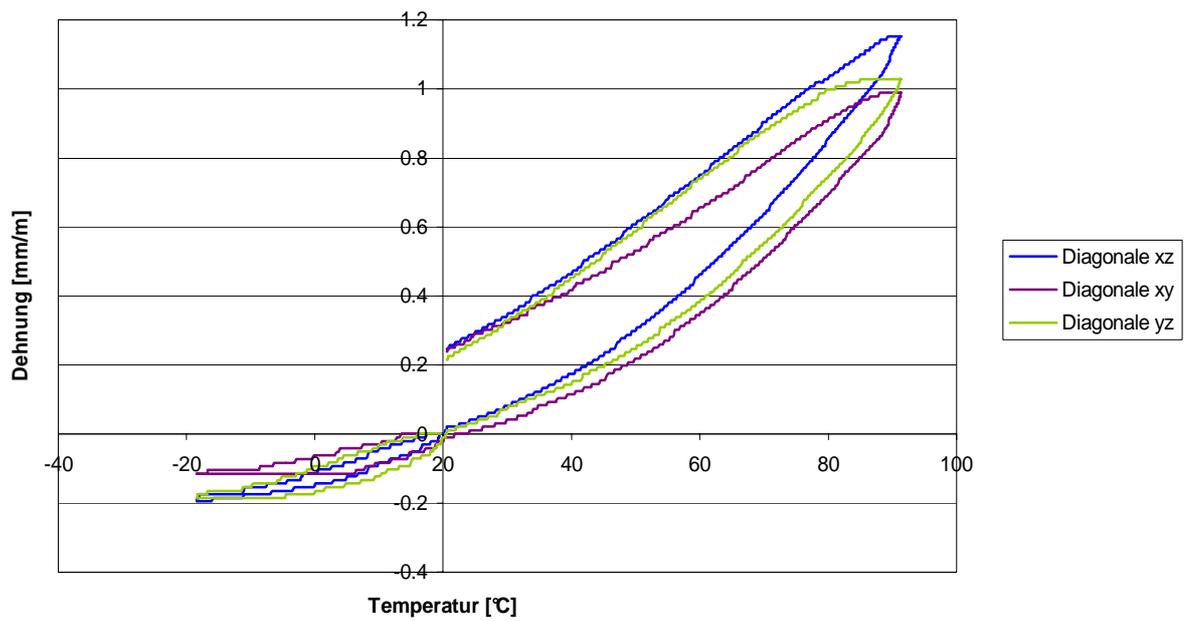


Abb. 19: Ergebnisse der thermischen Dilatation der Probe 68, a) parallel zu den drei Hauptgefügekoordinaten, b) parallel zu den drei Winkelhalbierenden.

Parallel zur Z-Richtung weist die Probe 32 den höchsten Ausdehnungskoeffizienten von maximal  $20,7 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (Zyklus  $90^\circ\text{C}$ ) auf (Tab. 4). Diese Richtung korreliert mit der bevorzugten kristallographischen Orientierung der c-Achsen (vgl. Abb. 12). Dagegen werden Werte von maximal  $12,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  parallel der X-Richtung gemessen, die mit der bevorzugten Orientierung der a-Achsen übereinstimmen.

Tab. 4: Richtungsabhängigkeit des Ausdehnungskoeffizienten ( $\alpha$ ) für verschiedene Temperaturbereiche.

<b>Probe 32:</b>						
im Bereich von	Z	X	Y	Diagonale XZ	Diagonale XY	Diagonale YZ
<b>5°C bis -5°C</b>	6.8692E-06	1.9665E-06	4.9164E-06	2.97361E-06	1.96262E-06	5.34173E-06
<b>40°C bis 50°C</b>	1.3909E-05	5.973E-06	8.9595E-06	1.00353E-05	8.94162E-06	1.10166E-05
<b>75°C bis 85°C</b>	2.0709E-05	1.2846E-05	1.7786E-05	1.79296E-05	1.77507E-05	2.00806E-05

<b>Probe 68:</b>						
im Bereich von	Z	X	Y	Diagonale XZ	Diagonale XY	Diagonale YZ
<b>5°C bis -5°C</b>	4.0409E-06	5.0309E-06	2.9945E-06	6.18614E-06	4.17564E-06	6.18614E-06
<b>40°C bis 50°C</b>	1.0083E-05	9.8415E-06	7.3721E-06	1.276E-05	1.0419E-05	1.00845E-05
<b>75°C bis 85°C</b>	1.8236E-05	2.0584E-05	1.6817E-05	2.254E-05	1.98905E-05	1.98517E-05

Die Differenz dieser Ausdehnungskoeffizienten zeigt, dass die Probe 32 eine deutliche Anisotropie der thermischen Ausdehnung aufweist.

Für die Probe 68 können die höchsten Ausdehnungskoeffizienten ( $22,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) auch parallel der bevorzugten Ausrichtung der c-Achsen (Diagonale XZ) gemessen werden. Die geringste Ausdehnung befindet sich parallel der Y-Richtung von  $2,99 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  (parallel a-Achsen, vgl. Abb. 12). Die Ergebnisse dieser Untersuchung weisen klar daraufhin, dass die Richtungsabhängigkeit der thermischen Dilatation deutlich von der Textur kontrolliert wird.

Die Untersuchungen zeigen weiterhin, dass bei verschiedenen Temperaturstufen der Ausdehnungskoeffizient ( $\alpha$ ) parallel der c- und a-Achsen bei beiden Proben stetig ansteigt (Abb. 20 b).

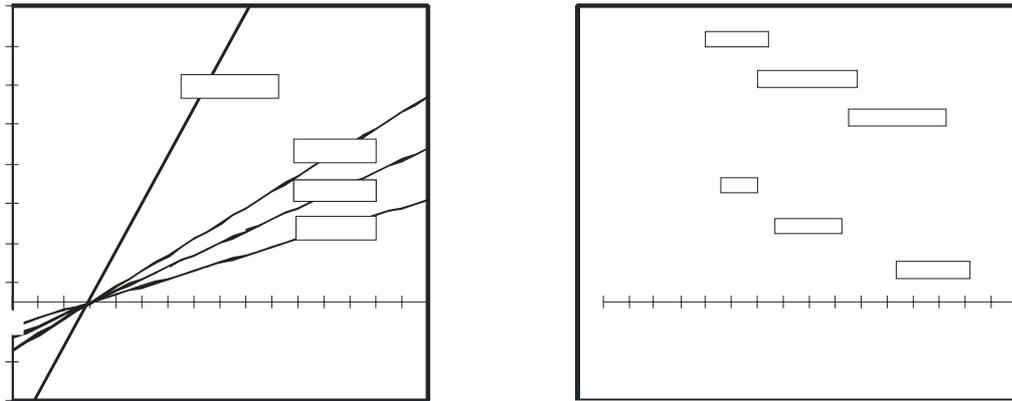


Abb. 20: Thermische Dehnung von Marmor: a) Auf der Basis der Calcit-Einkristalldaten berechnete Dehnung einer Marmorplatte mit der Länge von 1 m. b) Thermischer Ausdehnungskoeffizient ( $\alpha$ ) der Proben 32 und 68 für verschiedene Temperaturbereiche. Wenn  $\alpha$  eines bestimmten Marmors bekannt ist, kann die resultierende Dehnung direkt in a) abgelesen werden, nach RUEDRICH et al. (2001).

Für den Abkühlungszyklus bis  $-20^{\circ}\text{C}$  zeigen die Marmore eine zu erwartende Kontraktion. Dieses thermische Dehnung ist für die Probe 32 deutlich anisotrop.

Aus der Abbildung 18.a geht weiterhin hervor, dass parallel der X-Richtung die Kontraktion während der Abkühlung (ca.  $-3^{\circ}\text{C}$ ) zum Stillstand kommt und kein weiteres Dehnungsverhalten zu erkennen ist. Diese Phänomen tritt auch bei Probe 68 parallel der Y-Richtung auf (s. Abb. 19.a). Diese Ergebnisse zeigen, dass vor allem in Richtung der a-Achsen die Kontraktion beim Abkühlen gegen null geht. Dies gilt zwar auch für die anderen Richtungen, jedoch erst bei tieferen Temperaturen. Das thermische Verhalten der Probe 68 ist, wie bei Probe 32, bei negativen Temperaturen anisotrop.

Für beide Marmore ist eine nicht-reversible Längenänderung nach thermischer Beanspruchung (Heizzyklus) zu beobachten. Bei Abkühlung auf die Raumtemperatur wird die Ausgangslänge nicht mehr erreicht und es bleibt eine Restdehnung zurück. Die Restdehnung kann als ein Maß für eine Gefügeschädigung (z.B. Mikrorissbildung an den Korngrenzen) durch Erwärmung angesehen werden (WIDHALM et al., 1999).

Die Restdehnung der Probe 32 variiert zwischen 0,13 und 0,28 mm/m (Tab. 5). An diesen Daten ist bereits erkennbar, dass die Restdehnung ein anisotropes Verhalten aufweist, die auch deutlich in Abbildung 18 sichtbar ist. Die Ergebnisse der Probe 68 reichen von 0,19 und 0,24 mm/m (Tab. 5), die im Vergleich zu Probe 32, ein mehr isotropes Verhalten der bleibenden Längenänderung anzeigen.

Tab. 5: Richtungsabhängige Restdehnung in mm/m der Probe 32 und 68.

	Z	X	Y	Diagonale XZ	Diagonale XY	Diagonale YZ
<b>Probe 32</b>	0,1896	0,13	0,28	0,1915	0,1996	0,2113
<b>Probe 68</b>	0,2117	0,2108	0,1992	0,2263	0,2396	0,1852

Ein Marmor kann bereits nach einem thermischen Zyklus so geschädigt sein, dass bei weiteren Zyklen keine weitere Zunahme der bleibenden Verformung mehr beobachtet wird (WIDHALM et al. 1997). Die in dieser Arbeit untersuchten Proben bestätigen diese Beobachtung. Bei einem zweiten Aufheizzyklus konnte keine weitere Restdehnung beobachtet werden.

Nach WIDHALM et al. (1996) liegen gängige Werte für die bleibende Verformung, die durch das Aufheizen von Marmorproben bis auf 200°C ermittelt wurden, in der Größenordnung von 0,5 – 1,5 mm/m. Diese Werte entsprechen einer Längenänderung einer Probe mit 5 cm Länge in der Größenordnung von 25-75µm.

Werden beide Eigenschaften (thermische Anisotropie und Restdehnung) zusammen betrachtet, so ist vielfach beobachtet worden, dass die Hauptrichtungen, die die höchste thermische Dehnung aufweisen, auch die größte Restdehnung zeigen (SIEGESMUND et al., 2000).

Dies ist bei der Probe 32 parallel zu den Hauptrichtungen jedoch nicht der Fall. Parallel der Z-Richtung wird die höchste Dehnung erreicht, die größte Restdehnung zeigt aber die Hauptrichtung parallel Y. Eine mögliche Ursache hierfür könnte der Dolomit in der Probe sein bzw. die Korn zu Kornbeziehung zwischen Calcit und Dolomit.

Ein kritischer Parameter bei der thermischen Dilatation ist das erste Auftreten der bleibenden Verformung. Während einer Dilatationsmessung kann beobachtet werden, dass die Steigung der Hystereseschleife und damit auch der Ausdehnungskoeffizient ab bestimmten Temperaturen zunimmt (Abb. 21). Dies könnte dadurch erklärt werden, dass neben der thermischen Dehnung eine Mikrorissbildung auftritt.

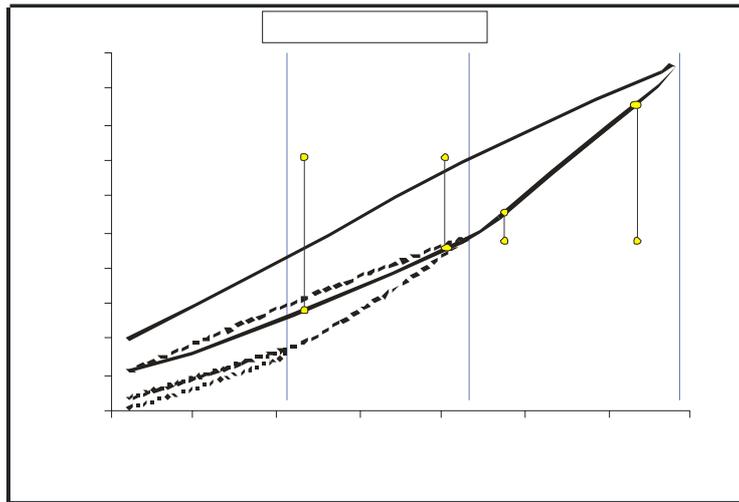


Abb. 21: Polyzyklisches Hysterese-Diagramm zeigt die Veränderung der thermischen Ausdehnung bei Überschreitung der Vorschädigung, aus RUEDRICH et al. 2001.

RUEDRICH et al. (2001) beobachtete, dass die Dehnung eines Marmors beim Heizzyklus über den Temperaturbereich der Vorschädigung signifikant ansteigt (Abb. 21). Die Zunahme des Ausdehnungskoeffizienten kann auf eine fortschreitende Rissbildung zurückgeführt werden. Der deutliche Anstieg der Dehnung bei zunehmender Temperatur, in Verbindung mit einer deutlichen Restdehnung, ist ebenfalls für die untersuchten Proben zu beobachten.

## 6. Zusammenfassung und Diskussion

Grundlegende Voraussetzung für eine nachhaltige Sanierung eines geschädigten Bauwerkes aus Marmor ist eine detaillierte Zustandsbeschreibung des verwendeten Materials. Die in dieser Arbeit durchgeführten petrographischen, gefügekundlichen und petrophysikalischen Untersuchungsmethoden haben gezeigt, dass die untersuchten Marmorproben teilweise deutliche Unterschiede in der mineralogischen Zusammensetzung, im Mikrogefüge und in den physikalischen Eigenschaften aufweisen.

Die gefügekundlichen Untersuchungen haben ergeben, dass die Probe 32 einen bimodalen Mineralgehalt aufweist. Neben dem Hauptbestandteil Calcit, kommt Dolomit in dünnen Lagen vor und zeichnet die Foliation nach. Die Probe 68 ist dagegen ein reiner Calcitmarmor, der keine weiteren Inhomogenitäten zeigt. Hinsichtlich der Entfestigung von Marmor kommt vor allem der Korngrenzengeometrie der einzelne Kristallite eine entscheidende Bedeutung zu. Die Korngrenzengeometrie des mittelkörnigen Marmors (Probe 32) ist überwiegend geschwungen und vereinzelt buchtig / gezahnt. Die grobkörnigen Kristalle der Probe 68 sind dagegen vor allem durch gerade und nur z.T. durch geschwungene Korngrenzflächen gekennzeichnet. Diese Korngrenzengeometrien weisen allgemein auf eine hohe Anfälligkeit für eine Entfestigung an Korngrenzen hin (SIEGISMUND et al., 2001). Die Aktivierung dieser interkristallinen Grenzflächen konnte bei der Probe 68 an geöffneten Korngrenzen deutlich beobachtet werden.

Um die wesentlichen Parameter des Porenraums zu charakterisieren, sind Messungen der Porosität und Porenradienverteilung durchgeführt worden. Die Porosität, die für beide Proben 0,25 Vol. % ergeben hat, macht sich in Marmor als Rissporosität bemerkbar. Nach den Ergebnissen der gefügekundlichen Untersuchungen hätte erwartet werden können, dass die Probe 68, aufgrund ihrer deutlich erkennbaren Korngrenzenentfestigung, auch eine höhere Porosität aufweist. Die Begründung für die vergleichbare Porosität liegt möglicherweise darin, dass Probe 32 eine geringere Korngröße hat als die Probe 68 und dadurch relativ mehr Korngrenzen, an denen eine interkristalline Rissporosität entstehen kann. Die Porenradienverteilung der Probe 32 ist, im Vergleich zur Probe 68, zu niedrigeren Porenradien (unterer Bereich der Kapillarporen) verschoben.

Zum Vergleich können nach RUEDRICH et al. (2001) verwitterte Marmore, wie z.B. ein Carrar-Marmor, eine Porosität bis zu 1 Vol. % aufweisen, dessen Porenradien deutlich im höheren Bereich der Kapillarporen liegen. Die zunehmende Auflockerung der Gefüges wird durch diese zunehmenden Porengröße verdeutlicht.

Auch in Bezug auf die kapillare Wasseraufnahme kann ein stark verwitterter Carrara-Marmor in einer wesentlich kürzeren Zeit mehr Wasser aufnehmen, als die Proben 32 und 68 (vgl. RUEDRICH et al., 2001). Demnach wird die kapillare Wasseraufnahme durch die Verteilung der Porenradialklassen kontrolliert.

Als entscheidender Prozess, der die Gefügauflockerung in kristallinen Marmor einleitet, wird die Mikrorissbildung angesehen (EVANS, 1978; FREDRICH & WONG, 1986). Dieser Prozess, der sich mikroskopisch als Risswachstum an Korngrenzen beschreiben lässt, ist überwiegend thermisch bedingt.

Die Untersuchungen der thermischen Dilatation der Marmore haben ergeben, dass beiden Proben eine Anisotropie der thermischen Ausdehnung mit zunehmender Temperatur zeigen. Diese Richtungsabhängigkeit wird deutlich von der Textur kontrolliert. Dies ist daran erkennbar, dass parallel zu der bevorzugten Orientierung der c-Achse sich die Marmorproben bei Erwärmung ausdehnen und parallel zu den a-Achsen eine Kontraktion stattfindet. Weiterhin ist bei beiden Proben eine Restdehnung, beim Heizzyklus bis 90 °C, nachgewiesen worden. Diese bleibende thermische Schädigung weist, bei Probe 32, ebenfalls eine Richtungsabhängigkeit auf. Die Restdehnung der Probe 32 ist zwar deutlich anisotrop, die größte Restdehnung wird jedoch nicht in der bevorzugten Richtung der c-Achse beobachtet. Eine mögliche Ursache hierfür könnte der in der Probe lagenartig angeordnete Dolomit sein. Im Gegensatz dazu zeigt die Probe 68 ein annähernd isotropes Verhalten der Restdehnung.

Die bleibende Längenänderung der Proben spiegelt sich auch in der Porenradialverteilung der thermisch beanspruchten Proben wider. Dort zeigen die Ergebnisse, dass sich die Porengröße nach einer Erwärmung auf 90°C vergrößert hat und sich wahrscheinlich sogar neue Poren gebildet haben.

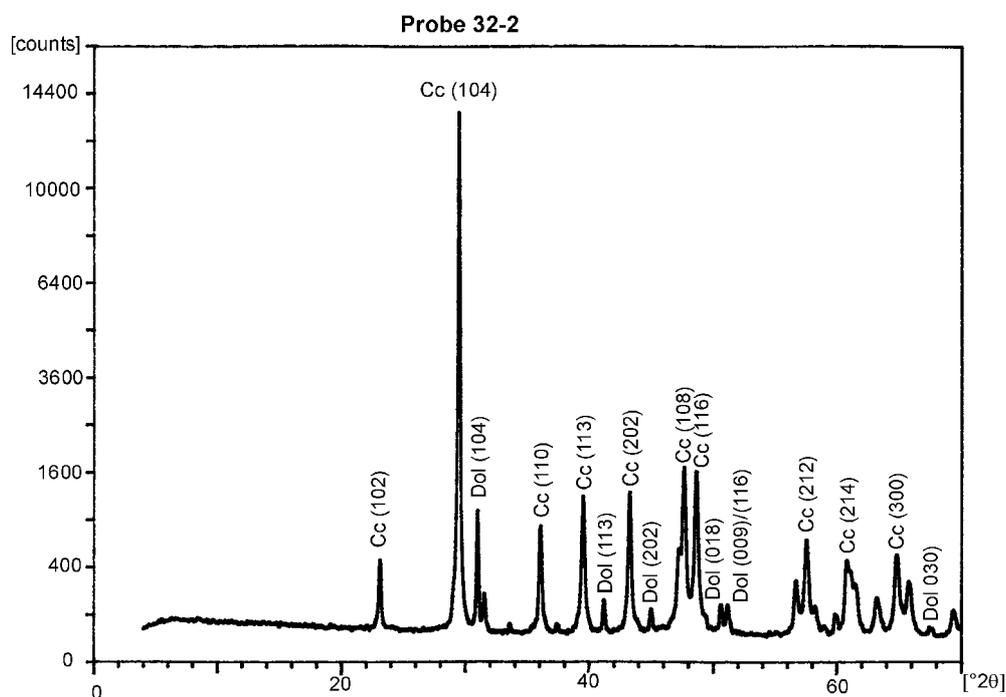
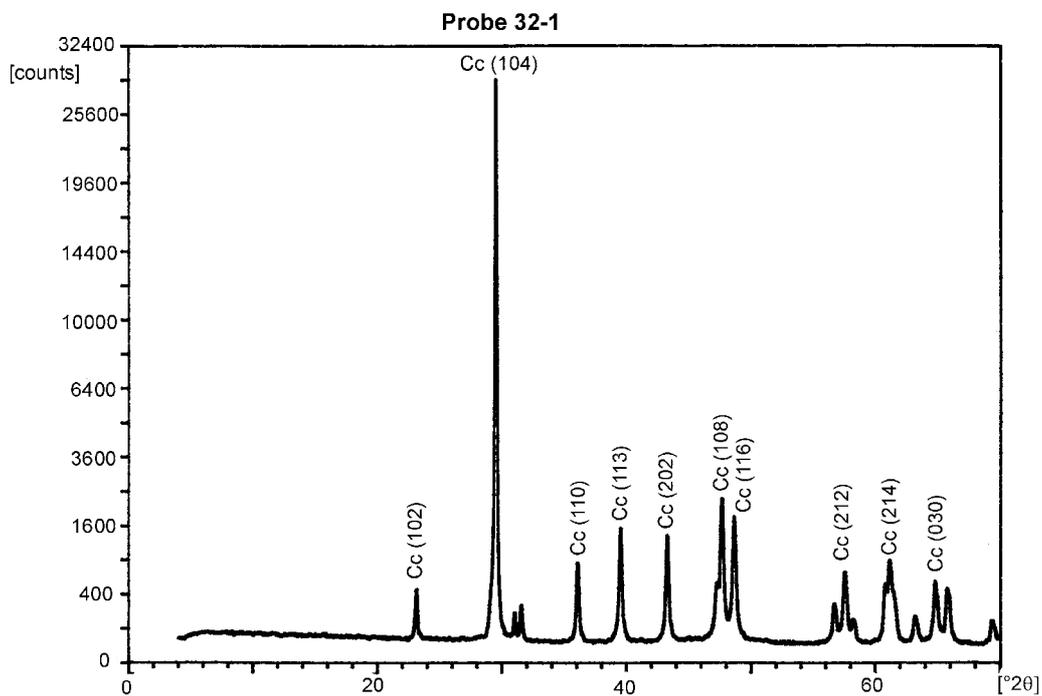
Mit Hilfe der Ergebnisse der oben angeführten Untersuchungen ist es möglich, Zusammenhänge zwischen mineralogischer Zusammensetzung, Gefüge und mechanischen und physikalischen Eigenschaften herzustellen. Um den Verwitterungszustand der untersuchten Marmorproben jedoch genauer zu charakterisieren, sind weiter gehende Untersuchungen notwendig. Für eine detaillierten Schadensanalyse dürfen Untersuchungsverfahren wie die Messung der Ultraschallgeschwindigkeiten, der hygri-sche Dehnung, der Biegezugfestigkeit und der Permeabilität nicht fehlen. Darüber hinaus gibt es eine Vielzahl von weiteren Untersuchungsverfahren, die zur Beschreibung von physikalischen und mechanischen Materialeigenschaften beitragen und daher zu einem besseren Verständnis der Verwitterungsprozesse von Marmor führen.

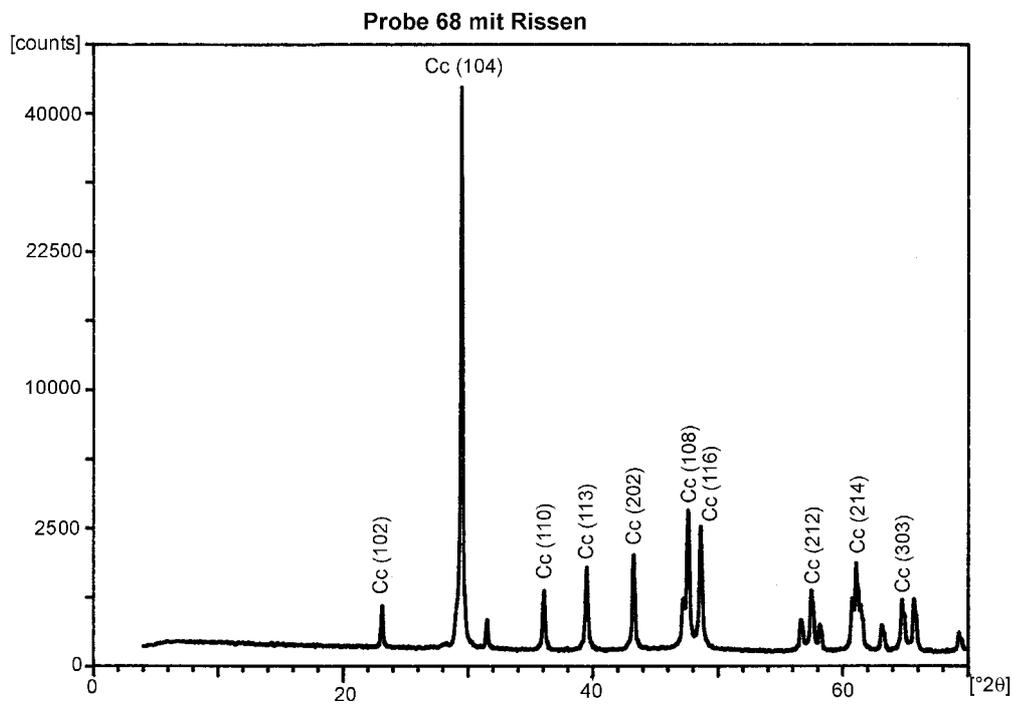
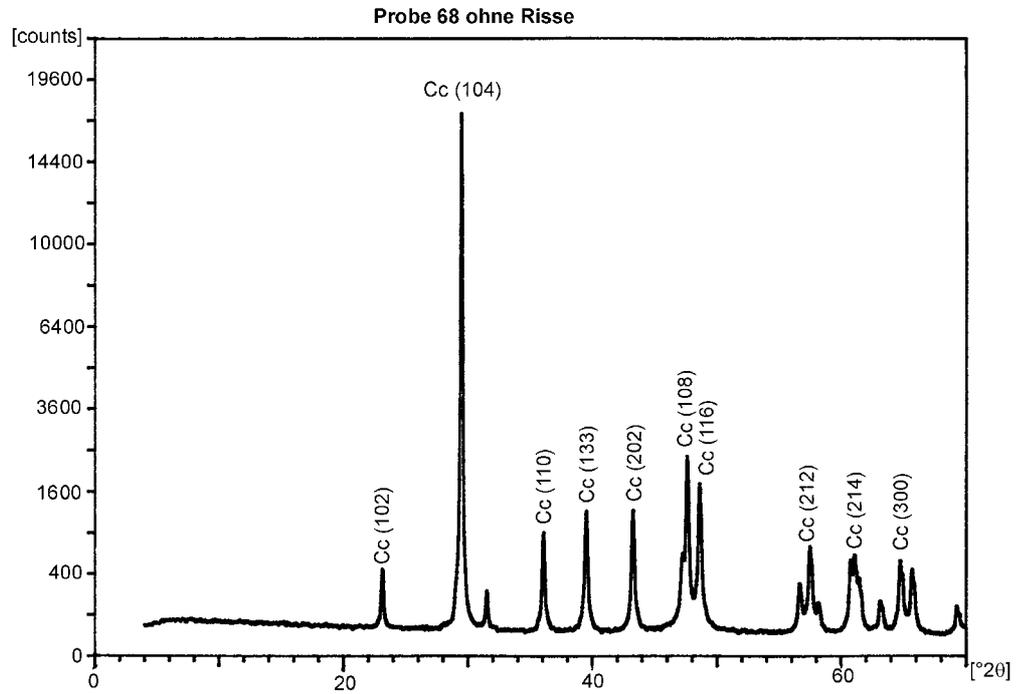
## 7. Literaturverzeichnis

- BATTAGLIA, S., FRANZINI, M. & MANGO, F. (1993): High sensitivity apparatus for measuring Linear thermal expansion: preliminary results on the response of marbles. – *Il Nuovo Limento* 16, 453-461.
- EVANS, A.G. (1978): Microfracture from thermal expansion anisotropy – 1. single phase system. - *Aachener Metallurgie*, 26: 1845-1853.
- FITZNER, B. & BASTEN, D. (1994): Gesteinsporosität – Klassifizierung, messtechnischer Erfassung und Bewertung ihrer Verwitterungsrelevanz. – *Jahresberichte Steinerfall-Steinkonservierung*, 19-32.
- FREDRICH, J.T. & WONG, T.F. (1986): Micromechanics of thermally induced cracking in three crustal rocks.-*J. Geophys. Res.*, 91 B12: 12743-12764.
- GRIMM, W.-D. (1999): Beobachtungen und Überlegungen zur Verformung von Marmorobjekten durch Gefügauflockerung. – *Z. dt. Geol. Ges.*, 150: 195 – 235.
- GROSS, C.J., WEBER, K., VOLLBRECHT, A. & SIEGSMUND, S. (1999): Cathodoluminescence and electron microprobe study of dolomitic marbles from Namibia: Evidence for hydrothermal alteration. – *Z. dt. Geol. Ges.*, 150: 195-235.
- HAHN-WEINHEIMER, P., HIRNER, A. & WEBER-DIEFENBACH, K. (1984): Grundlagen und praktische Anwendung der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). – Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.
- KÄSTNER, V. & Weise, S. (1992): Das Markttor von Milet. – Staatliche Museen zu Berlin-Preußischer Kulturbesitz, 1992 (Führungsblatt - Nr. ANT.3).
- KLEBER, W. (1959): Einführung in die Kristallographie. VEB Verlag Technik, Berlin.
- KLOPFER, H. (1985): Feuchte. In: *Lehrbuch der Bauphysik* (edited by al., L. e.). Teubner, Stuttgart, 265-434.
- KOCH, A. & SIEGSMUND, S. (2001): Gesteinstechnische Eigenschaften ausgewählter Bausandsteine. – *Z. dt. Geol. Ges.*, 152: 681-700.
- KÖHLER, W. (1991): Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara Marmor in Potsdam Sanssouci. – *Steinschäden – Steinkonservierung. Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland*, 2, 50-55.
- LEISS, B. & ULLEMEYER, K. (1999): Texture characterisation of carbonate rocks and some Implications for modeling of physikal anisotropies, derived from idealized texture Types. – *Z. dt. Geol. Ges.*, 150: 259-274.
- PASSCHIER, C. W. & TROUW, R. A. J. 1996. *Microtectonics*. Springer, Berlin.

- POSCHLOD, K. (1990) : Das Wasser im Porenraum kristalliner Naturwerksteine und sein Einfluss auf die Verwitterung. – Münchner geowissenschaftliche Abhandlung: Reihe B, Allgemeine und angewandte Geologie 7, 1-62.
- RÖSLER, H.J. (1999): Lehrbuch der Mineralogie. – Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.
- RUEDRICH, J., WEISS, T. & SIEGSMUND, S. (2001): Deterioration characteristics of marble from the Marmorpalais Potsdam (Germany): a complication. – Z. dt. Geol. Ges., 152: 1-27.
- SIEGSMUND, S., VOLLBRECHT, A., ULLEMEYER, K., WEISS, T. & SOBOTT, R. (1997): Application of geological fabric analyses for the characterization of natural building Stones – case study Kauffung marble (in German).- International Journal for Restoration of Buildings and Monuments, 3:269-292.
- SIEGSMUND, S., ULLEMEYER, K., WEISS, T. & TSCHEGG, E.K. (2000): Physical weathering of Marbles caused by anisotropic thermal expansion. – Springer-Verlag, 89: 170-182.
- SIEGSMUND, S., WEISS, T. & RUEDRICH, J. (2001): Marmorpalais wird originalgetreu Restauriert. – Naturstein Denkmalpflege, 5/2001.
- STROCKA, V.M.- de Gruyter (1981): Das Markttor von Milet. Winkelsmannprogramm der Archäologischen Gesellschaft zu Berlin; 128.
- TSCHEGG, E.K., WIDHALM, C. & EPPENSTEINER, W. (1999): Ursachen mangelnder Formbeständigkeit von Marmorplatten. – Z. dt. Geol. Ges., 150: 283-297.
- WEISS, G. (1992): Die Eis- und Salzkristallisation im Porenraum von Sandsteinen und ihre Auswirkung auf das Gefüge unter besonderer Berücksichtigung gesteinspezifischer Parameter. – Münchner geowissenschaftliche Abhandlung: Reihe B, Allgemeine und Angewandte Geologie 9, 118 S.
- WEISS, T., LEISS, B., OPPERMAN, H. & SIEGSMUND, S. (1999): Microfabric of fresh and weathered marbles: Implications and consequences for the reconstruction of the Marmorpalais Potsdam. – Z. dt. Geol. Ges., 150: 313-332.
- WIDHALM, C., TSCHEGG, E. & EPPENSTEINER, W. (1996): Anisotropic thermal expansion causes deformation of marble cladding. – J.of Performance of Constructed facilities, ASCE, 10: 5-10.
- WIDHALM, C., TSCHEGG, E. & EPPENSTEINER, W. (1997): Anisotropic thermal expansion causes deformation of marble cladding. – J.of Performance of Constructed facilities, ASCE, 10: 5-10.

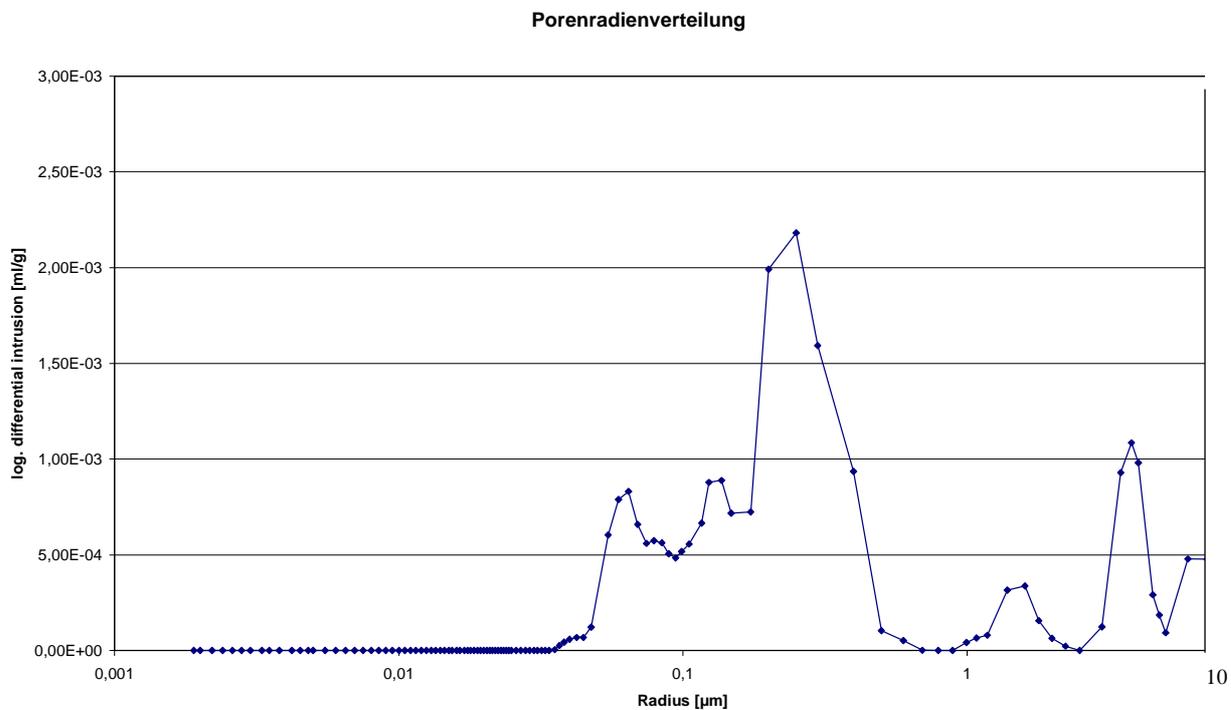
WIDHALM, C., EPPENSTEINER, W. & TSCHEGG, E. (1999): Meßmethoden zur Beschreibung von Gefügeanisotropien in Marmor. – Z. dt. Geol. Ges., 150: 275-281.



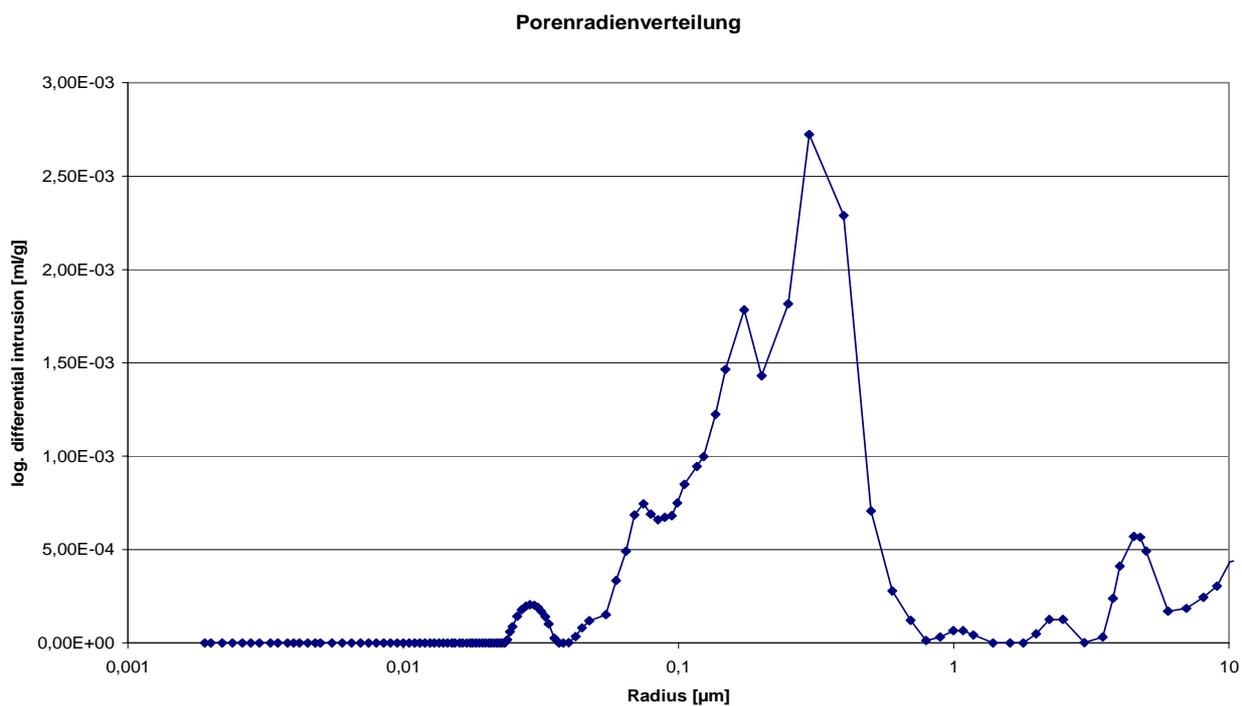


## Anhang III: Porenradienverteilung von Probe 32

### Probe 32: unbehandelt

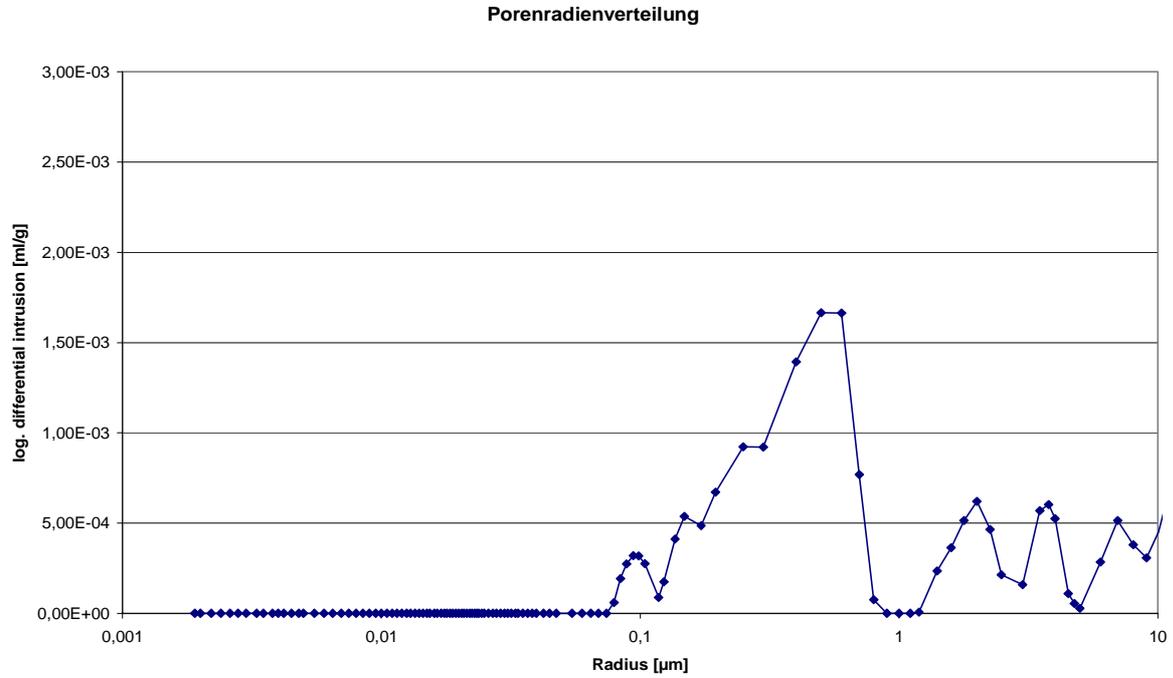


### Probe 32, thermisch behandelt

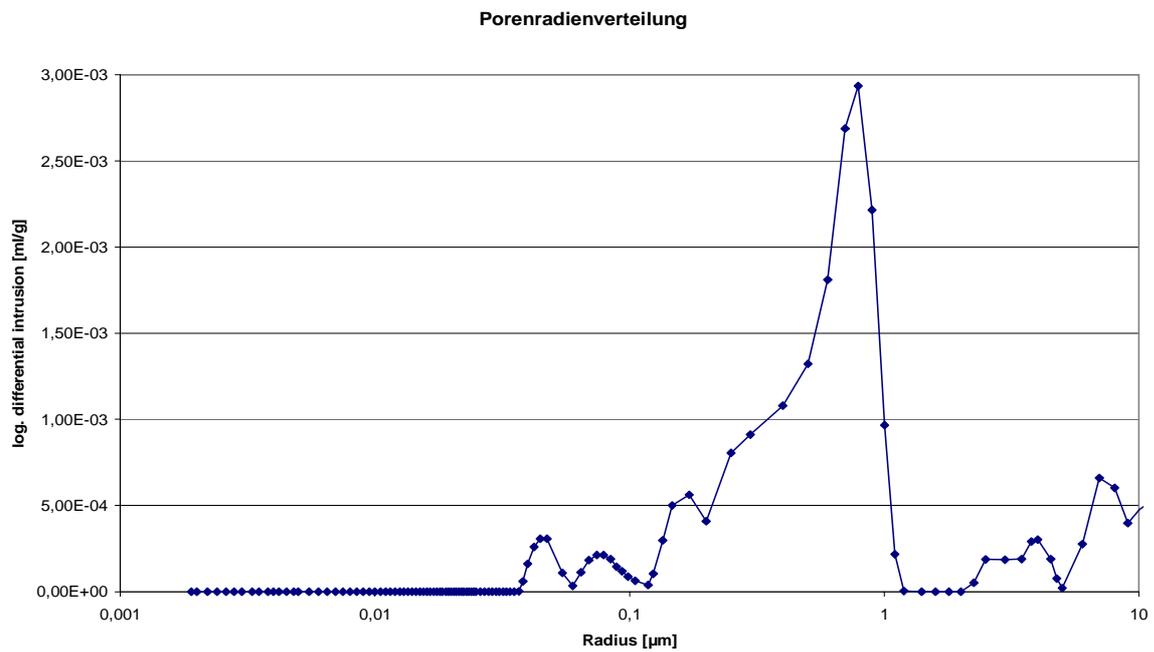


## Anhang IV: Porenradienverteilung der Probe 68

### Probe 68, unbehandelt



### Probe 68, thermisch behandelt





## Anlage 8

Untersuchung zur Verwendung verschiedener  
Marmortypen am Markttor von Milet, Pergamon  
Museum/Berlin

Jörg Rüdric, Geowissenschaftliches Zentrum der  
Universität Göttingen



# **Untersuchungen zur Verwendung verschiedener Marmortypen am Markttor von Milet, Pergamon Museum / Berlin**

**Untersuchungsbericht  
vorgelegt von**

**Dipl. Geol. Jörg Rüdrich und Prof. Dr. Siegfried Siegesmund**



## Inhaltsverzeichnis

1 Zur Situation, Fragestellung und Vorgehensweise .....	2
2 Marmortypen und ihre makroskopischen Gefügeeigenschaften.....	2
2.1 Vorwiegend undifferenzierter Marmor (1A/1B).....	3
2.2 Unregelmäßig gebänderter Marmor (2A/2B).....	4
3 Unterscheidung der Marmore am Gebäude .....	5
4 Verteilung der Marmortypen am Markttor.....	6

Anlagen 1-10: Lithologische Karten verschiedener Ansichten des Marktores

### 1 Zur Situation, Fragestellung und Vorgehensweise

Ursprüngliche Marmorfragmente des Marktores von Milet sind seit ca. 80 Jahren in einem weitgehend originalgetreuen Nachbau mittels Stahlgerüst und modellierten Kunststeinteilen im Pergamon Museum auf der Museumsinsel in Berlin aufgestellt. Im Zuge von Sanierungsarbeiten am Pergamonmuseum sollen ebenfalls Arbeiten am Markttor durchgeführt werden. Da hier auch ein vollständiger Abbau des Marktores angedacht ist, besteht die Möglichkeit einer weitreichenden Sanierung des Objektes. Dies betrifft nicht nur allein die beanspruchte Stahlkonstruktion und die geschädigten Kunststeinteile sondern auch die Objekte aus Marmor. Für eine objektangepasste Sanierung der Marmore ist die Kenntnis des Erhaltungszustandes aber auch der petrographischen Zusammensetzung und der Gefügebrauchung von entscheidender Bedeutung. Da bekannt ist, dass unterschiedliche Marmortypen am Gebäude verbaut sind, stellte sich die Frage, wie viel unterschiedliche Typen Verwendung fanden und wie ihre Verteilung am Objekt sich darstellt. Zu diesem Zweck wurde eine Kartierungskampagne in der 25 Kalenderwoche 2003 am Markttor von Milet durchgeführt.

In einem ersten Schritt wurden die im Keller des Pergamon Museums gelagerten Reststücke und Säulenbohrkerne analysiert. Auf der Basis der so gewonnenen gefügekundlichen Erkenntnisse erfolgte eine grundlegende Untergliederung der Marmortypen am Markttor. Die Kartierung wurde in eine Karte des Marktores (überarbeitete Rohfassung, gewonnen mittels Multispektralanalytik) im Maßstab 1:50 eingetragen. Die Kartiergrundlage wurde vom Büro Arge Pfanner zur Verfügung gestellt.

### 2 Marmortypen und ihre makroskopischen Gefügeeigenschaften

Zur generellen Untergliederung der Marmore erfolgte eine gefügekundliche Analyse der im Keller des Pergamon Museums gelagerten Reststücke und Säulenbohrkerne. Auf der Basis der makroskopischen Beobachtungen wie Foliation, Riss- und Mineralisationsgefüge sowie Korngrößen konnten zwei grundlegend unterschiedliche Marmortypen gegeneinander abgegrenzt

werden. Hierbei handelt es sich um einen vorwiegend undifferenzierten und einen unregelmäßig gebänderten Marmor.

## 2.1 Vorwiegend undifferenzierter Marmor (1A/1B)

Der vorwiegend undifferenzierte Marmor repräsentiert ein relativ homogenes Gestein und ist durch ein weitgehendes Fehlen von Gesteinstrukturen gekennzeichnet. Nur vereinzelt sind isolierte dunkelgraue Bänder im Gestein zu beobachten. Zusätzlich können lokal auftretende Gesteinsstrukturen, wie z.B. mineralisierte Risse, ermittelt werden (vgl. Tabelle 1).

Der vorwiegend undifferenzierte Marmor weist nach makroskopischen Beobachtungen an Restmaterialien (Keller des Pergamon Museums) eine grauweiß Farbe auf (Tafel 1 Abb. 1). Am Objekt ist diese aufgrund der Patina und/oder des Schmutzbelages nur selten zu erkennen. Nur vereinzelt zeigt dieser Marmortyp dunkelgraue Bänder, welche isoliert vorkommen und die Foliation nachzeichnen (Tafel 1 Abb. 3). Die Bänder verlaufen generell geradlinig und sind streng begrenzt. Sie erreichen Mächtigkeiten von zumeist 3 cm (Tafel 2, Abb. 1). Die Häufigkeit und Ausbildung der Bänderung ist mit weiteren Signaturen in der lithologischen Karte belegt, welche in Tabelle 1 aufgeführt sind. Die Körnung des Marmors ist nur vereinzelt, vor allem an Absandenden Objektbereichen, abschätzbar (Tafel 2 Abb. 2). Dabei befindet sich die makroskopisch zu eruiierende mittlere Korngröße vorwiegend im Bereich von 1,0 mm bis 1,5 mm und ist somit als mittelkörnig zu beschreiben (Kartenkürzel =  $\alpha$ ; vgl. Tabelle 1). Informationen über das Korngefüge des Marmors sind nur in Zonen starker Entfestigung zu ermitteln. In Bereichen des feinkörnigen Absandens sind die Flächen der entfestigten Körner zumeist leicht rundlich und nicht reflektierend, womit diese Flächen als Korngrenzen gewertet werden können. Nur selten sind hingegen reflektierende, ebene Flächen zu beobachten. Diese repräsentieren intrakristalline Flächen wie Spaltflächen und Zwillings Ebenen. Somit kann für diesen Marmor von einer weitgehenden Korngrenzenentfestigung ausgegangen werden. Dieses Phänomen der Korngrenzenentfestigung ist typisch für Marmore die ein gleichkörnig polygonales Korngefüge besitzen.

Tabelle 1: Signaturen der lithologischen Karte und ihre Bedeutung

Kürzel	Bedeutung
y	schlierenartige Bänderung
x	strenge Bänderung
Z	schwach gebändert
w	stark gebändert
$\alpha$	kleinkörnig
$\emptyset$	klein- bis mittelkörnig
$\beta$	mittelkörnig
e	häufige Eisenoxidnester
m	mineralisierte Risse
n	Mineralnester
g	grobspätige Calcite
c	crack seal Risse

Für den vorwiegend undifferenzierten Marmor können zusätzlich verschiedene, nur lokalverbreitete Gefügemerkmale einer postmetamorphen Überprägung beobachtet werden (s. Tafel 1 bis 3). Häufigst auftretendes Merkmal ist das Vorkommen mineralisierter Risse (Kartenkürzel = n; Tafel 1, Abb. 1 und Tafel 2, Abb. 3). Die Rissweiten liegen im Bereich von wenigen Millimetern. Die den Riss verfüllenden Mineralisate weisen hellrote Farbe auf und sind feinstkörnig. Eine genaue petrographische Bestimmung der Mineralphasen ist nur mit weiterführenden Laboruntersuchungen, wie z.B. der Rasterelektronenmikroskopie, möglich. Eine Ausnahme der Risse bildet ein faserartig verwachsener mineralisierter Riss, dessen Entstehung auf einen „crack seal“-Mechanismus zurückzuführen ist (Kartenkürzel = c; Tafel 2 Abb. 6). Daneben können auch mineralisierte Nester beobachtet werden, die zumeist taschenförmige Geometrie besitzen und scharfe Begrenzungen zum umgebenden Marmor aufweisen (Kartenkürzel = m; Tafel 1 Abb. 2 und Tafel 2 Abb. 4). Sie zeigen, mit feinstkörnigen rötlichen Verwachsungen, die gleichen Mineralfüllungen wie die mineralisierten Risse. Die Ausdehnung der Mineralnester befindet sich im Zentimeter- bis Dezimeter-Bereich. Als weiteres Gefügemerkmal des vorwiegend undifferenzierten Marmortyps sind vereinzelt grobspätige Calcit-Verwachsungen festzustellen (Kartenkürzel = g; Tafel 2 Abb. 5). Die einzelnen Calcit-Individuen erreichen dabei 2-3 cm Größe. Die Verwachsungen zeigen eine Ausdehnung im Dezimeterbereich.

Zur weitergehenden Untergliederung des vorwiegend undifferenzierten Marmors in der lithologischen Karte wurde zwischen Marmor ohne und mit Bänderung unterschieden. Im ersten Fall trägt der Marmor das Kürzel 1B in der lithologischen Karte. Beim Vorhandensein einzelner dunkelgrauer Bänder erfolgte die Markierung der Objekte mit dem Kürzel 1A.

## 2.2 Unregelmäßig gebänderter Marmor (2A/2B)

Der unregelmäßig gebänderte Marmor repräsentiert ein stark strukturiertes Gestein. Charakteristisches Gefügemerkmal ist ein ausgeprägter Lagenbau.

Nach makroskopischen Beobachtungen an ausgebohrten Säulenkernen zeigt dieser Marmor ein weißes bis weißgraues Erscheinungsbild. Wesentliches Gefügemerkmal ist eine deutliche Bänderung, welche die Foliation nachzeichnet (Tafel 1 Abb. 5 und 6). Hierbei können zwei unterschiedliche Arten von Materialwechslern beobachtet werden. Zum einen handelt es sich hierbei um schwach gelblich bis leicht rötliche, zum anderen um hellgraue bis graue Lagen (Tafel 3 Abb. 3). Zwischen diesen Bändern weist der Marmor zumeist eine weiße Erscheinung auf. Die mittlere Korngröße ist, nach makroskopischen Beobachtungen in absandenden Bereichen des Gesteins, auf ca. 0,5 mm einzuschätzen. Somit ist der Marmor als kleinkörnig zu bezeichnen. Vergleichbar zum oben beschriebenen vorwiegend undifferenzierten Marmortyp können in Bereichen des feinkörnigen Absandens vorwiegend leicht gerundete Flächen beobachtet werden. Somit ist eine Korngrenzenentfestigung als bevorzugte Lokalität der Mikrorissbildung festzustellen und folglich von einem mehr oder weniger gleichkörnig polygonalen Korngefüge des unregelmäßig gebänderten Marmortyps auszugehen.

Die schwach gelblichen bis leicht rötlichen Bänder besitzen eine Mächtigkeit im Bereich von einigen Millimetern. Ihre Anordnung kann sowohl relativ streng parallel aber auch sehr

unregelmäßig sein (Tafel 1 Abb. 5 und 6). Die Abstände untereinander befinden sich im Bereich einiger Zentimeter. Makroskopisch ist die Körnung und auch die mineralogische Zusammensetzung innerhalb der Bänder nicht zu eruieren. Aufgrund von Erfahrungswerten ist zu vermuten, dass es sich hierbei um feinstkörnige Verwachsung von Dolomit und Calcit handelt. Die schwach gelblich bis leicht rötlichen Bänder sind farblich am Bauwerk nicht von den Hauptbereichen des Marmors zu unterscheiden. Dies ist auf die ausgeprägte Patina, eine deutliche Aufrauung der Oberflächen durch die Verwitterung und auf den deutlichen Schmutzbelag zurückzuführen. Eine sichere Erfassung des Lagenbaus ist nur anhand der unterschiedlichen Rückwitterungsraten der verschiedenen Marmorbereiche möglich. Dabei weisen die schwach gelblich bis leicht rötlichen Bänder eine wesentlich höhere Verwitterungsresistenz gegenüber den Hauptbereichen des Marmors auf und bilden ein positives Relief (Tafel 3 Abb. 2 und 4).

Die Bänder hellgrauer bis grauer Erscheinung weisen eine unregelmäßige Begrenzung zum umgebenden Gestein auf. Sie verlaufen mehr oder weniger parallel zu den schwach gelblichen Bändern. Die grauen Lagen erreichen Mächtigkeiten bis zu einigen Zentimetern. Der Materialwechsel ist hier vermutlich auf feinverteilten Graphit oder auch Pyrit im Gestein zurückzuführen. Die Rückwitterungsrate ist gleich derjenigen der Hauptbereiche des Marmors. Somit sind die grauen Bänder nicht anhand morphologischer Unterschiede am Bauwerk zu detektieren.

Eine weitergehende Untergliederung des unregelmäßig gebänderten Marmors in der lithologischen Karte erfolgt anhand des Auftretens der verschiedenen Bänderungen. Dabei wurden Marmorobjekte bei denen nur die gelblich rötlichen Bänder zu beobachten sind mit 2A markiert. Marmorobjekte bei denen beide Bänderungstypen festzustellen sind, tragen die Bezeichnung 2B. Aufgrund der starken Patina und des Schmutzbelages ist davon auszugehen, dass die grauen Bänder am Gebäude vielfach nicht eindeutig zu erkennen sind. Daher ist eine sichere Abgrenzung der beiden Varianten des unregelmäßig gebänderten Marmors am Markttor nur bedingt möglich.

### 3 Unterscheidung der Marmore am Gebäude

Entscheidendes Kriterium für die Unterscheidung der beiden Marmortypen am Bauwerk war das Auftreten von verwitterungsbedingten Reliefbildungen durch die resistenteren gelblich bis rötlichen Bänder im unregelmäßig gebänderten Marmor. Da die Korngröße vor Ort deutlich variiert, konnte sie bei der Kartierung nicht als entscheidendes Merkmal für die Unterteilung der Marmore herangezogen werden. Die Korngröße wurde nur als weiteres Argument für die Bestimmung des jeweiligen Marmortyps einbezogen.

Die postmetamorphen Überprägungsgefüge des vorwiegend undifferenzierten Marmors ermöglichen eine weitgehend sichere Bestimmung dieses Marmors am Bauwerk. Hierbei sind vor allem mineralisierte Risse aber auch Mineralnester und grobspätige Calcit-Verwachsungen von Bedeutung. Wo diese Merkmale fehlen ist die Einordnung nur bedingt möglich. Dies gilt insbesondere für die Rückwand des Markttors, da hier die Marmorobjekte häufig durch einen Belag, möglicherweise eine Schlemme, überdeckt sind. Bei vollständigem Fehlen von

Gefügemerkmalen wurden die entsprechenden Objekte mit einem Fragezeichen in der lithologischen Karte markiert.

#### 4 Verteilung der Marmortypen am Markttor

Für die Verteilung der beiden charakterisierten Marmortypen ist keine generelle Anordnung am Bauwerk zu erkennen, die auf (i) eine stilistische Verwendung, (ii) auf Bauabschnitte des Gebäudes oder (iii) auf eine variierende Verfügbarkeit der unterschiedlichen Marmore aufgrund von Abbauphasen im Steinbruch zurückzuführen ist. Folgende Auffälligkeiten können jedoch festgestellt werden:

- gewisse Anordnung der Marmortypen in den Giebelbereichen
- Säulenschäfte der oberen Ordnung werden generell von Marmortyp 1 gebildet
- Säulenkapitelle werden generell von Marmortyp 1 gebildet
- Säulenbasen werden generell von Marmortyp 1 gebildet

Hingegen weisen die Säulenschäfte der unteren Ordnung eine sehr heterogene Verteilung der Marmortypen auf. Dies gilt ebenfalls für den Architrav und die Friese, wobei hier der vorwiegend undifferenzierte Marmortyp dominiert. Die Dominanz des vorwiegend undifferenzierten Marmortyps kann für das gesamte Markttor von Milet festgestellt werden.



(Dipl. Geol. Jörg Rüdric)

Göttingen, der 15.08.2003

## Tafel 1



Abb. 1: Ausgebohrter Säulen kern des vorwiegend undifferenzierten Marmors mit mineralisiertem Riss.

Abb. 2: Ausgebohrter Säulen kern des vorwiegend undifferenzierten Marmors mit mineralisierten Nestern.

Abb. 3: Kassettendecke zeigt ein isoliertes graues Foliationsband im vorwiegend undifferenzierten Marmor (Pfeil).

Abb. 4: Ausgebohrter Säulen kern zeigt einen Sonderfall des vorwiegend undifferenzierten Marmors in Form einer strengen engständigen Bänderung grauer Lagen.

Abb. 5: Ausgebohrter Säulen kern des unregelmäßig gebänderten Marmors mit streifenartiger Anordnung gelblich bis rötlicher und grauer Lagen.

Abb. 6: Unregelmäßig gebänderten Marmor mit schlierenartiger Ausbildung des Lagenbaus.

## Tafel 2

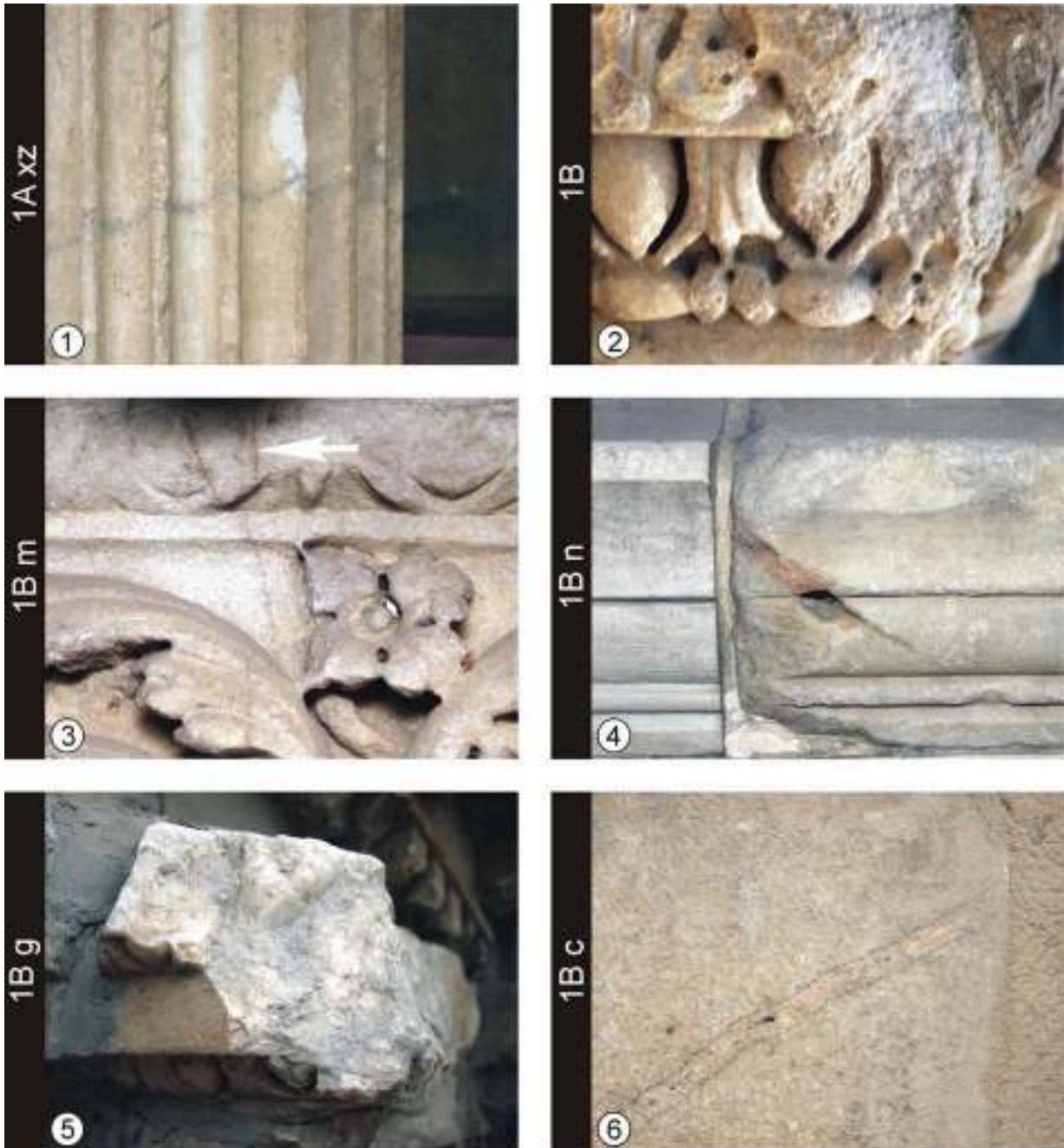


Abb. 1: Säulenschaft des vorwiegend undifferenzierten Marmors mit isoliertem grauen Foliationsband.

Abb. 2: Zone feinkörnigen Absandens des vorwiegend undifferenzierten Marmortyps.

Abb. 3: Risse mit rötlichen Mineralisaten im vorwiegend undifferenzierten Marmor (Pfeil).

Abb. 4: Vorwiegend undifferenzierter Marmor mit stark herausgewittertem Mineralnest.

Abb. 5: Grobspätige Calcit-Verwachsungen im vorwiegend undifferenzierten Marmor.

Abb. 6: Durch einen „crack seal“-Mechanismus verschlossener Riss im vorwiegend undifferenzierten Marmor.

## Tafel 3

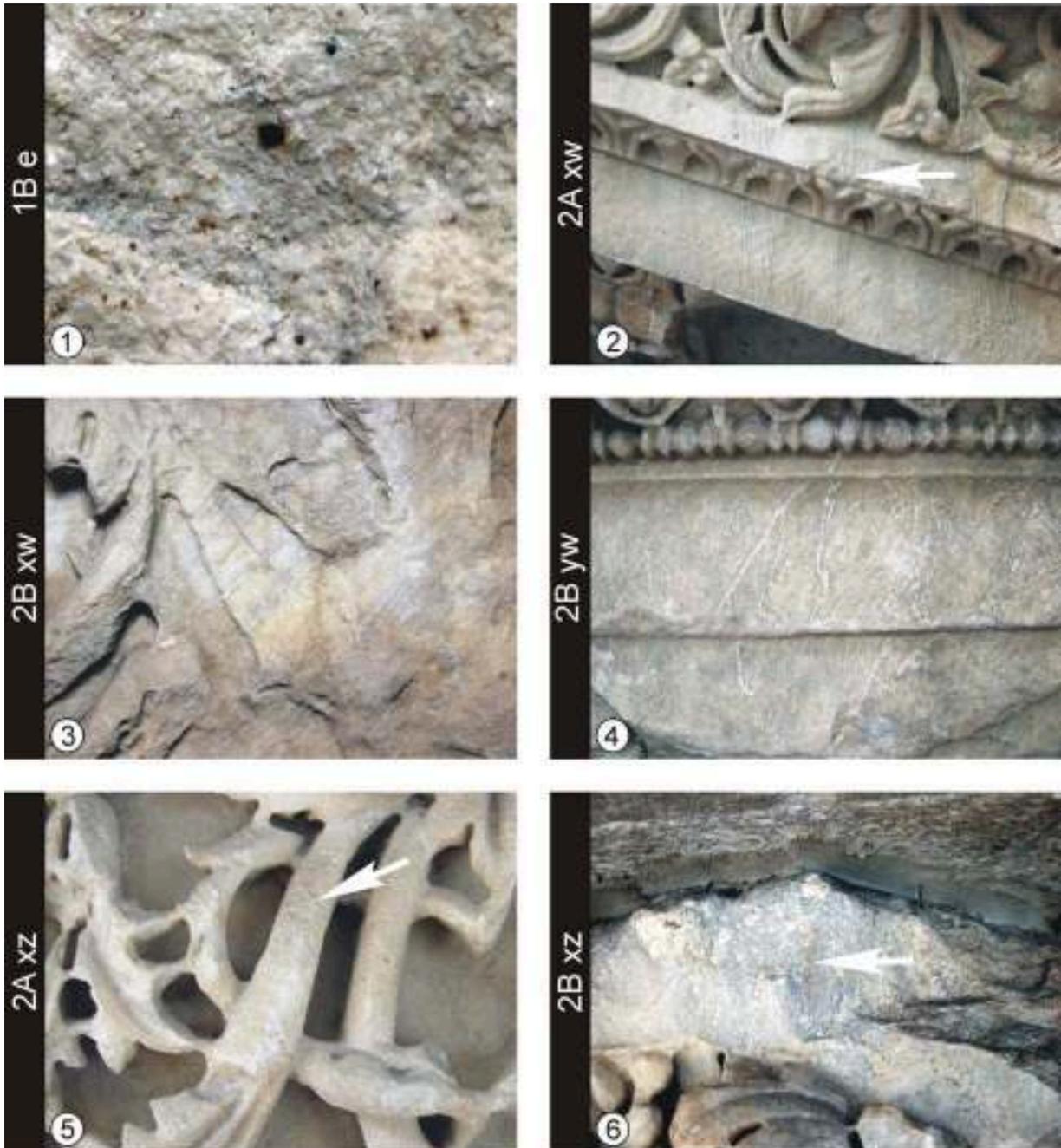


Abb. 1: Vorwiegend undifferenzierten Marmor mit häufigem Auftreten von Eisenoxidnestern.

Abb. 2: Durch Verwitterung herauspräparierte Bänder im unregelmäßig gebänderten Marmor (Pfeil).

Abb. 3: Parallelverlaufende Bänderung grauer und weißlich verwitternder Erscheinung im unregelmäßig gebänderten Marmor.

Abb. 4: Durch Verwitterung herauspräparierte schlierenartige Bänderung des Marmortyp 2.

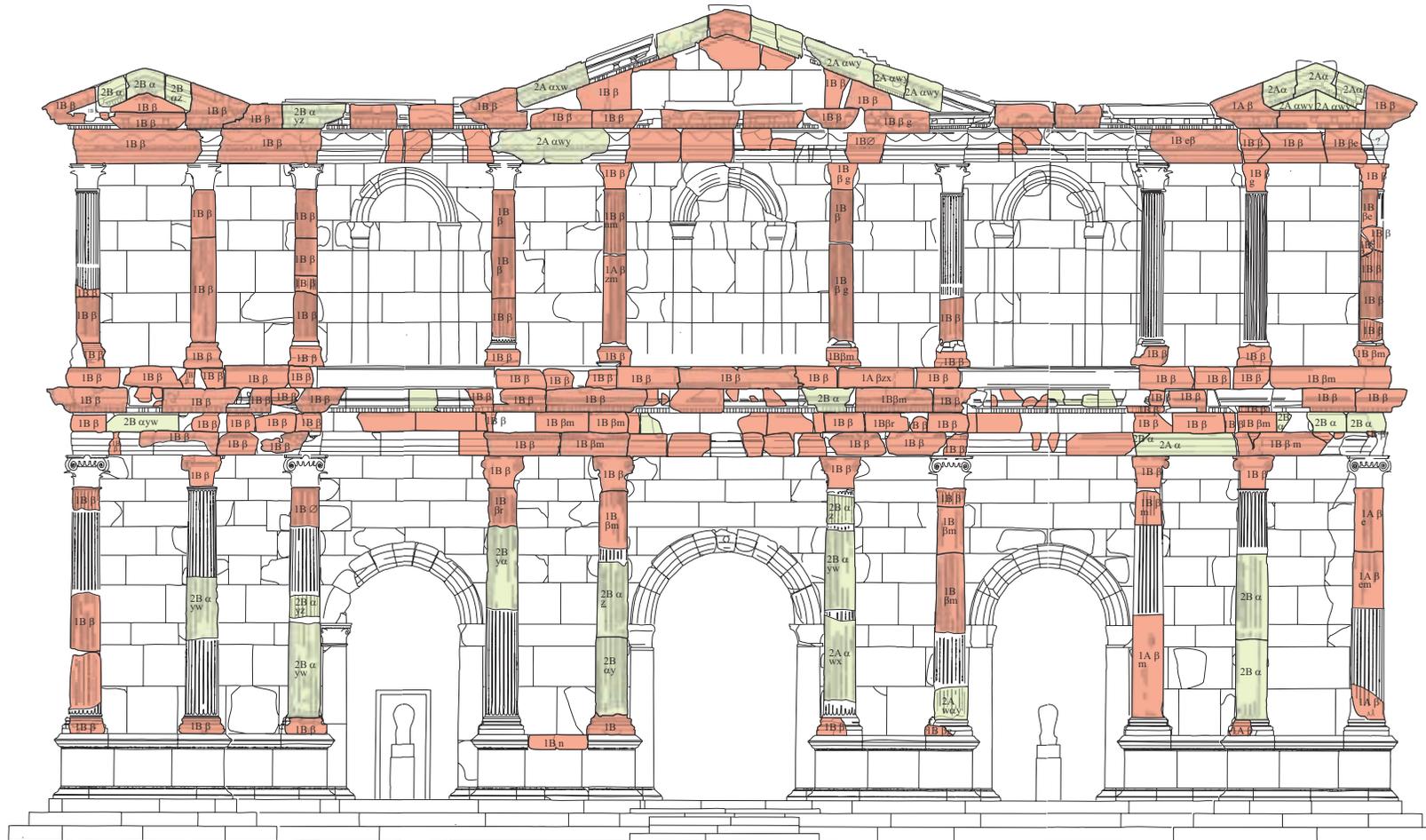
Abb. 5: Häufig nur schwer am Bauteil zu identifizierende Bänder des unregelmäßig gebänderten Marmors (Pfeil).

Abb. 6: Im „frischen“ Bruch erkennbare rötlich bis gelbliche Farben von Bändern im unregelmäßig gebänderten Marmor (Pfeil).

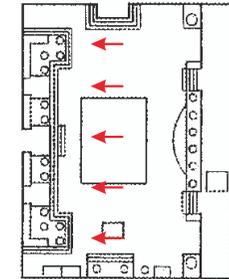
# Lithologische Karte des Markttors von Milet/Pergamon Museum Berlin

erstellt von Dipl. Geol. Jörg Rüdric

Maßstab 1:50



Blickrichtung



## Legende

- 1 A/B Marmor vorwiegend undifferenziert (A=mit und B=ohne Bänderung)
- 2 A/B Marmor gebändert (A=Dolomitadern und B=zusätzlich graue Bänder)
- y schlierenartige Bänderung
- x strenge Bänderung
- z schwach gebändert
- w stark gebändert
- α feinkörnig
- ∅ fein bis feinkörnig
- β feinkörnig
- e Eisenoxidpigmentierung
- m Mineralisierte Risse
- n Mineralnester
- g grobspätige Calcite
- c crack seal Adern
- ? keine ausreichenden Gefügebeobachtungen



## Anlage 9

Mineralogische, gefügekundliche und  
gesteintechnische Eigenschaften von Geomaterialien  
des Markttores von Milet.

Diplomarbeit, Katrin Müller, Geowissenschaftliches  
Zentrum der Universität Göttingen



**Mineralogisch, gefügekundliche und  
gesteintechnische Eigenschaften von  
Geomaterialien des Markttores von Milet**

Diplomarbeit vorgelegt von

**Kathrin Müller**

aus

Göttingen

angefertigt am

Göttinger Zentrum Geowissenschaften  
Abteilung Strukturgeologie / Geodynamik  
der

Georg-August-Universität

2004

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1 Allgemeines.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
<b>2. Das Markttor von Milet.....</b>	<b>3</b>
<b>3. Methodik.....</b>	<b>6</b>
3.1 Dünnschliffmikroskopie.....	6
3.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM).....	6
3.3 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA).....	9
3.4 Röntgendiffraktometrie (RDA).....	11
3.5 Ionenchromatographie (IC).....	12
3.6 Quecksilberdruckporosimetrie.....	15
3.7 Bestimmung des dynamischen E-Moduls.....	16
3.8 Bestimmung der Druckfestigkeit.....	17
3.9 Ultraschallmessung.....	17
<b>4. Untersuchtetes Probenmaterial.....</b>	<b>19</b>
<b>5. Gefügekundliche und mineralogische Eigenschaften.....</b>	<b>24</b>
5.1 Probenmaterial des Aufbaus von 1925-1929.....	26
5.1.1 Marmorsäule: Bohrkern I (BK I).....	26
5.1.1.1BK I – Marmor.....	26
5.1.1.2BK I – Ziegel.....	27
5.1.1.3BK I - Zementmörtel.....	28
5.1.2 Marmorsäule: Bohrkern II (BK II).....	31
5.1.2.1BK II – Marmor.....	31
5.1.2.2BK II – Kalkmörtel.....	32
5.1.2.3BK II- Ziegel.....	32
5.1.2.4BK II - Zementmörtel.....	32
5.1.3 Rückwand: Bohrkern III (BK III).....	36
5.1.3.1BK III - Deckschicht.....	36
5.1.3.2BK III - Kalkmörtel.....	37
5.1.3.3BK III -Ziegel.....	37
5.1.4 Sockel: Bohrkern IV (BK IV).....	39
5.1.4.1BK IV – Deckschicht.....	39
5.1.4.2BK IV – Kalkmörtel 1.....	40

5.1.4.3BK IV – Ziegel.....	40
5.1.4.4BK IV - Kalkmörtel 2.....	40
5.1.4.5BK IV – Marmor.....	41
5.1.5 Restaurierte Säule: Bohrkern V (BK V).....	44
5.1.5.1BK V – Deckschicht.....	44
5.1.5.2BK V – Zementmörtel.....	44
5.1.5.3BK V – Kalkmörtel.....	45
5.1.5.4BK V – Ziegel.....	45
5.2 Probenmaterial des Aufbaus von 1952-1959.....	48
5.2.1 Restaurierte Säule: Bohrkern VI (BK VI).....	48
5.2.1.1BK VI – Deckschicht.....	48
5.2.1.2BK VI – Beton.....	49
5.2.2 Rückwand: Bohrkern VII (BK VII).....	51
5.2.2.1BK VII – Außenputz.....	51
5.2.2.2BK VII - Rückwand.....	51
5.3 Pergamonaltarprobe (PA).....	53
5.3.1 PA – Deckschicht.....	53
5.3.2 PA – Zementmörtel.....	54
5.3.3 Pa – Ziegel.....	54
5.4 Ergebnisse der Ionenchromatographie.....	56
<b>6. Zusammenfassende Interpretation der gefügekundlichen und mineralogischen Eigenschaften.....</b>	<b>58</b>
<b>7. Petrophysikalische Eigenschaften.....</b>	<b>64</b>
7.1 Porenradienverteilung.....	64
7.2 Druckfestigkeiten und dynamischer E-Modul.....	68
<b>8. Fallstudie 1: Ultraschallgeschwindigkeitsmessungen an mörtelgefüllten Marmorhohlzylindern in verschiedenen Erhaltungszuständen.....</b>	<b>70</b>
8.1 Makroskopische Beobachtungen.....	72
8.2 Ergebnisse der Ultraschallmessungen.....	73
<b>9. Klimasituation am Markttor von Milet im Pergamonmuseum.....</b>	<b>80</b>
<b>10. Zusammenfassung.....</b>	<b>85</b>
<b>11. Literaturverzeichnis.....</b>	<b>88</b>

## ANHANG

- Anhang I: Messwerte der Porositätsverteilung mittels Quecksilberdruckporosimetrie
- Anhang II: Prüfzeugnis der Druckfestigkeitsbestimmung
- Anhang III: Ultraschallgeschwindigkeitsmessungen an mörtelgefüllten Marmorhohlzylindern
- Anhang IV: Röntgendiffraktometeraufnahmen der verschiedenen Geomaterialien im Marktort von Milet und des Probenstücks des Pergamonaltars

## Verzeichnis der Fototafeln

- Tafel 1: Bohrkern I-III und ihre entsprechenden Entnahmepunkte
- Tafel 2: Bohrkern IV-VI und ihre entsprechenden Entnahmepunkte
- Tafel 3: Bohrkern VII mit Entnahmepunkt und Probestück vom Pergamonaltar
- Tafel 4: Dünnschliff und REM-Aufnahmen aus Bohrkern I
- Tafel 5a: Dünnschliff und REM-Aufnahmen aus Bohrkern II
- Tafel 5b: Dünnschliff und REM-Aufnahmen aus Bohrkern II
- Tafel 6: Dünnschliff und REM-Aufnahmen aus Bohrkern III
- Tafel 7a: Dünnschliff und REM-Aufnahmen aus Bohrkern IV
- Tafel 7b: Dünnschliff und REM-Aufnahmen aus Bohrkern IV
- Tafel 8a: Dünnschliff und REM-Aufnahmen aus Bohrkern V
- Tafel 8b: Dünnschliff und REM-Aufnahmen aus Bohrkern V
- Tafel 9: Dünnschliff und REM-Aufnahmen aus Bohrkern VI
- Tafel 10: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Probenstück des Pergamonaltars
- Tafel 11: Mit Mörtel verfüllte Marmorhohlzylinder
- Tafel 12: Mit Acrylharz getränkte Zylinder

# 1. Einleitung

## 1.1 Allgemeines

Das Markttor von Milet repräsentiert einen prunkvollen Fassadenbau aus Marmor basierend auf einer römisch hellenistischen Bauweise. Die Trümmer des um 130 n.Chr. errichteten Tores wurden 1903 in der altertümlichen Stadt Milet ausgegraben und im Pergamonmuseum wiederaufgebaut. Der Wiederaufbau eines Bauwerkes dieser Größe ist innerhalb eines Museums in dieser Form einzigartig. Aufgrund statischer Probleme wurden die Säulen des Markttors während des Wiederaufbaus hohlgebohrt, auf ein Stahlgerüst gezogen und die Hohlräume mit Mörteln und Ziegeln aufgefüllt. Jedoch der genaue innere Aufbau und die verwendeten Materialien sind aufgrund fehlender Überlieferung weitgehend unklar. Da das Pergamonmuseum in den kommenden Jahren umgebaut werden soll, ist auch ein vollständiger Abbau des Markttores von Milet angedacht. Dies bietet die Möglichkeit das Markttor grundlegend zu sanieren.

Der Witterung ausgesetzter Geomaterialien erfahren durch physikalische, chemische und biologische Prozesse eine Gefügeflockung, die im Laufe der Zeit zur Zerstörung des Materials führt. Die verbauten Geomaterialien des Markttors von Milet weisen multiple Zerstörungsphänomene wie Rissbildungen, abgeplatzte Kanten, Salzausblühungen und Krustenbildung auf. Zusätzliche Schäden wurden durch einen Bombentreffer im zweiten Weltkrieg verursacht.

Im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes „Das Markttor von Milet: Schadensanalyse und modellhafte Sanierungskonzepte“, geleitet von Herrn Prof. Dr. Siegesmund, wurden zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten am Markttor durchgeführt. Diesem Projekt ist auch die vorliegende Arbeit zuzuordnen. Zu den bereits durchgeführten Arbeiten gehört z.B. eine Schadenskartierung vom Markttor, durchgeführt von der ARGE beratende Geologen und Restauratoren, Dehnungsmessungen an Rissen (Universität Kassel), physikalische Messungen mit Hilfe des Georadars (TU Berlin) und der Leitfähigkeit (Universität Leipzig) und das Aufzeigen von Bioimpakten (Universität Göttingen).

Parallel hierzu wurden an der Universität Kassel (MAACK, 2003) verschiedene Mörtelmischungen getestet, die bei einer Sanierung des Markttores zum Einsatz kommen könnten.

## 1.2 Zielsetzung

Die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit beinhaltet die Ermittlung der mineralogischen, gefügekundlichen und gesteintechnischen Eigenschaften der Geomaterialien des Markttores von Milet (Pergamonmuseum Berlin). Die verschiedenen im Markttor verbauten Materialien sind Marmore, verschiedene Mörtel und Ziegel. Um möglichst alle Materialien zu erfassen, wurden gezielt an verschiedenen Gebäudesituationen Bohrkerne entnommen (s. Kap. 4).

Zur gefügekundlichen Charakterisierung wurden die Licht- und Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung und der Phasenbestand wurden durch die Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und Röntgendiffraktometrie (RDA) bestimmt. Daneben wurden ausgewählte mechanisch-physikalische Eigenschaften wie der dynamische E-Modul, die Druckfestigkeit und die Porenradialverteilung ermittelt. Um eventuell vorhandene Salzbildungen in den Mörteln zu erfassen, wurden zusätzlich die Sulfat-, Nitrat- und Chlor-Anionengehalte mit der Ionenchromatographie analysiert.

Darüber hinaus wurde in einer Fallstudie überprüft, inwieweit sich ausgewählte Ersatzmörtel (Maack, 2003) in Verbindung mit dem Marmor verhalten. Hierfür wurden mit Mörteln gefüllte Marmorhohlzylinder künstlich verwittert, indem sie Temperaturschwankungen im Klimaschrank ausgesetzt wurden. Danach wurden sie einer Ibach-Tränkung mit Acrylharz unterzogen und anschließend wiederholt thermisch beansprucht. Die Veränderungen wurden mittels Messungen der Ultraschallgeschwindigkeiten überprüft (s. Kap. 8).

Um festzustellen welchen Temperatur- und Luftfeuchtigkeitschwankungen das Markttor ausgesetzt ist, wurde die Klimasituation im Museum aufgezeichnet (s. Kap. 9).

## 2. Das Markttor von Milet

Milet gehörte im Altertum zu den bedeutendsten griechischen Städten an der Westküste Kleinasiens (KÄSTNER & WEISE, 1992). Sie lag direkt am Meer und war im 8. Jh.v.Chr. bereits eine reiche Handelsstadt. Durch eine allmähliche Versandung der Meeresbucht verloren die Häfen Milets in der Spätantike an Bedeutung. Die Stadtanlage war von einem hellenistisch-römischen Baustil geprägt. Das besondere dieser Stadt war ein schachbrettartiges Bebauungsschema mit einer rechtwinkligen Straßenführung.

Das Markttor von Milet wurde um 130 n.Chr. errichtet (KÄSTNER & WEISE, 1992) (siehe Abb. 2.1). Es handelt sich hierbei um einen prunkvollen Fassadenbau. Das Markttor besitzt einen 28,92 m breiten Unterbau, wobei die Höhe 16,68 m bis zur Spitze des Mittelgiebels beträgt.



**Abb. 2.1:** Das Markttor von Milet im Pergamonmuseum in Berlin.

Im Mittelalter wurde das Tor vermutlich durch ein Erdbeben zerstört (KÄSTNER & WEISE, 1992). Die Trümmer des Tores wurden 1903 von Theodor Wiegand und Hubert Knackfuß entdeckt und ausgegraben. Aufgrund einer Fundteilung mit der Türkei konnte es im Pergamonmuseum wieder aufgebaut werden. Der Aufbau gestaltete sich jedoch schwierig, so dass zahlreiche Änderungen am Bauwerk aufgrund statischer Probleme vorgenommen werden mußten. So wurden zur Stabilisierung des Marktttores die Säulen

hohlgebohrt (s. Abb. 2.2) und innen mit einem Stahlgerüst versehen. Die Hohlräume wurden mit verschiedenen Materialien, wie Mörtel und Ziegel aufgefüllt. Der Sockel und die Decke bestehen aus Stahlbetonplatten, welche mit original Marmorfragmenten verkleidet worden sind. Seit 1930 ist das Markttor den Besuchern zugänglich.



**Abb. 2.2:** Hohlgebohrte Säule.

Während des Zweiten Weltkrieges wurde das Tor durch Bombenangriffe erheblich beschädigt (s. Abb. 2.3). Zur Wiederherstellung waren umfangreiche Restaurierungsmaßnahmen notwendig (KÄSTNER & WEISE, 1992). Säulen welche völlig zerstört waren, wurden nachgebaut und von außen mit einem Steinerfüllmörtel, welcher dem Marmor ähnlich sieht, versehen. Seit 1954 ist das Markttor wieder öffentlich zu besichtigen.



**Abb. 2.3:** Rechter Teil des Marktttores von Milet nach einem Bombentreffer im Zweiten Weltkrieg.

## **3. Methodik**

### **3.1 Dünnschliffmikroskopie**

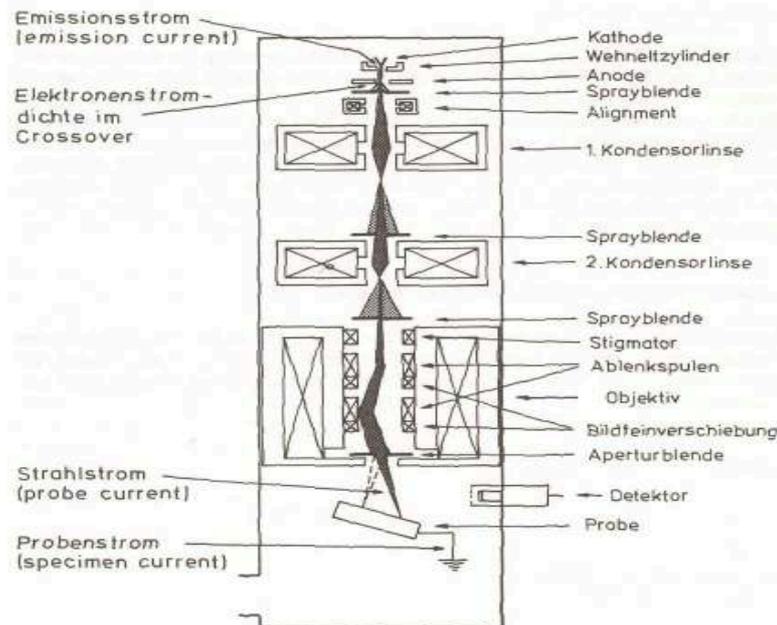
Die Durchlichtmikroskopie wurde eingesetzt um den mineralogischen Phasenbestand und das Gefüge der einzelnen Materialien zu ermitteln. Untersucht wurde das Gefüge der Marmore, der Phasenbestand der Zuschlagstoffe bzw. Bindemittel und deren Verbund untereinander. Wegen der ausserordentlichen Feinkörnigkeit der Ziegel ist eine Bestimmung seiner mineralogischen Zusammensetzung mit optischen Hilfsmitteln nur sehr beschränkt möglich.

Für die Dünnschliffe wurden von den einzelnen Bohrkerne verschiedene Teile abgetrennt, mit Harz getränkt, anschließend geschliffen und auf eine Dicke von 20-30 µm poliert.

### **3.2 Rasterelektronenmikroskopie (REM)**

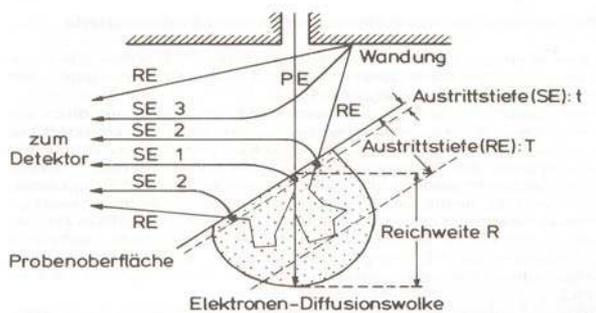
Zur Untersuchung der Struktur und der Porenräume wurden die Dünnschliffe mit dem Rasterelektronenmikroskop LEO 1455 VP betrachtet. Als Detektor wurde ein „Four Quadrant BackScattered Electron Detector Type 214“ (QBSD) benutzt. Für die qualitative Mineralbestimmung der Zuschläge und Bindemittel wurden mit einem energiedispersiven Röntgenspektrometer (EDX) Elementspektren aufgenommen. Gegen eine elektrische Aufladung der Proben während der Bildaufnahme wurden die Dünnschliffe und Proben mit Kohlenstoff bedampft.

Die Funktionsweise eines Rasterelektronenmikroskops basiert auf der Abrasterung der Probenoberfläche mittels eines feingebündelten Elektronenstrahls. Die Elektronen werden in einem thermisch geheizten Wolfram-Draht, der Kathode, erzeugt. Durch ein zwischen Kathode und Anode liegendes elektrisches Feld werden die Elektronen auf ihre entsprechende Primärenergie beschleunigt. Gebündelt werden sie durch eine Wehnelt-Elektrode, welche auch zwischen Kathode und Anode liegt. Die magnetischen Linsen im weiterführenden Strahlengang dienen zur weiteren Bündelung des Elektronenstrahls (s. Abb. 3.1).



**Abb. 3.1:** Schematische Darstellung einer REM-Säule mit dem Verlauf des Elektronenstrahls (Schmidz et al., 1994).

Zwischen dem auf der Probe auftreffenden Elektronenstrahl und den in der Probe selbst befindlichen Atomen finden Wechselwirkungen statt. Eine Form der Wechselwirkung ist, dass Elektronen aus dem Primärstrahl von den positiv geladenen Atomkernen abgelenkt und quasi reflektiert werden. Diese so entstandenen Elektronen sind hochenergetisch und werden als Rückstreuetelektronen (RE) bezeichnet. Trifft der Elektronenstrahl auf ein Atom, kann ein Elektron aus den äußeren Elektronenschalen herausgeschlagen werden und das Atom wird ionisiert. Durch diesen Prozess entstehen niederenergetische Sekundärelektronen (SE). Die Entstehung und Austrittstiefe von RE und SE ist in Abb. 3.2 dargestellt. Mit entsprechenden Detektoren können diese Signale registriert werden. Diese Signale werden synchron zu der zeilenförmigen Abrasterung der Probe auf einer Bildröhre aufgezeichnet. Bereiche mit starken Signalen erscheinen hell auf der Bildröhre und Stellen mit schwachen Signalen erscheinen dunkel. Je höher die positive Ladung an den Atomkernen ist, desto stärker ist die Ablenkung der primären Elektronen. Aus diesem Grund werden mit zunehmender Ordnungszahl (bzw. mit steigendem Atomgewicht) der Elemente in der Probe auch mehr Rückstreuetelektronen die Probe wieder verlassen. Dies führt dazu, dass Bereiche mit schwereren Atomen im Bild heller erscheinen. Allerdings ist das Auflösungsvermögen einer Sekundärelektronen-Abbildung gegenüber eines Rückstreuetelektronen-Bildes besser, da Sekundärelektronen auf Grund ihrer niedrigeren



**Abb. 3.2:** Entstehung der Rückstreu- (RE) und Sekundärelektronen (SE): (1) Primärelektronen (PE) lösen SE aus einer Tiefe  $t$  von 5-50 nm aus: SE1. (2) RE treten aus größerer Tiefe  $T = 0,1-6 \mu\text{m}$  aus. (3) RE lösen SE in einer Schicht der Tiefe  $t$  auch weit entfernt vom Auftreffort der PE aus (SE2). (4) RE können auch an der Probenkammerwand SE auslösen, die zum Rauschuntergrund beitragen (REIMER & PFEFFERKORN, 1977).

Energie nur aus einer geringeren Probentiefe wieder heraustreten können und somit das Probenvolumen geringer ist.

Ein wesentlich selteneres Ereignis ist die Ionisation innerer Atomschalen. Bei der Rückkehr des Atoms in seinen „Grundzustand“ wird Röntgenstrahlung in Form von Röntgenquanten ausgesendet. Deren Energie ist von der Ordnungszahl des ionisierten Atoms und von der Elektronenschale die ionisiert wurde, abhängig. Jedes Element liefert so seine „charakteristische

Röntgenstrahlung“ (siehe auch Kap. 3.6: RDA), welche zur Identifikation von Elementen genutzt werden kann.

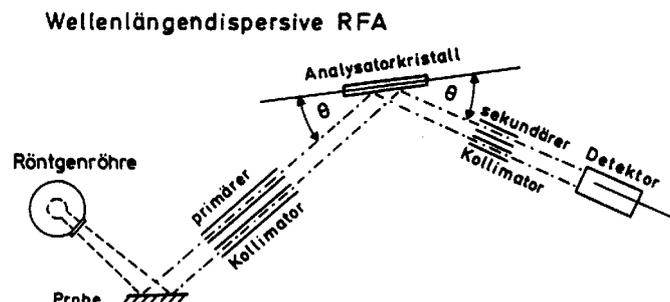
Dazu wird ein energiedispersives Röntgenspektrometer (EDX-Spektrometer) verwendet. In diesem Spektrometer befindet sich ein Detektorkristall, welcher aus Silizium besteht. Trifft ein Röntgenquant den Kristall wird ein, seiner Energie proportionaler, Ladungsimpuls erzeugt. Dieser Impuls gelangt über einen Verstärker in einen Analog-Digital-Wandler, in welchem ihm entsprechend seiner Größe eine Adresse zugeteilt wird und in dem entsprechenden Kanal eines Vielkanalanalysators gespeichert wird. Ein Vielkanalanalysator besteht aus mehreren Impulzzählern, von denen jeder einer ganz bestimmten Energie zugeordnet ist. Ein registrierter Impuls erhöht also den Zählerstand jenes Zählers um eine Einheit, welcher der Energie des auslösenden Röntgenquants entspricht. Davon wird ein Spektrum erzeugt, in welchem die Intensität gegen die Energie der Röntgenstrahlung aufgetragen wird. Aus den Energien der einzelnen Röntgenlinien kann auf die Elemente in der Probe geschlossen werden.

### 3.3 Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA)

Die RFA repräsentiert eine Methode zur Erfassung der chemischen Zusammensetzung der einzelnen Proben. Die Messung erfolgte an Schmelztabletten mit einem wellenlängendispersiven „Philips PW 1480“-Sequenzspektrometer.

Die Schmelztabletten wurden aus 0,7 g Probe (welche vorher mit der Achat-Kugelmühle aufgemahlen wurde (→ Korngröße < 125  $\mu\text{m}$ ) und 4,2 g Schmelzmittel (Lithiumtetraborat) hergestellt.

Nach HAHN-WEINHEIMER et al. (1984) arbeitet die wellenlängendispersive RFA (WDRFA) nach dem Schema: Anregung charakteristischer Wellenlängen, deren Selektion und Intensitätsmessung. Ein schematischer Aufbau der wellenlängen dispersiven RFA zeigt die Abb. 3.3.



**Abb. 3.3:** Schematischer Aufbau der wellenlängendispersiven RFA (HAHN-WEINHEIMER ET AL., 1984).

In einer, vorher von Luft evakuierten, 3 kW-Röntgenröhre (Vakuum) werden Elektronen mit einer Spannung von  $V_0 = 60$  kV bis maximal 125 kV auf eine Rhodium(Rh)-Anode beschleunigt. Die Anode entsendet daraufhin die für Rh charakteristische Röntgenstrahlung. Die Energie dieser Strahlung ist so groß, dass beim Auftreffen auf die Probe kernnahe Elektronen der verschiedenen Atome herausgeschossen werden können. Die dabei entstandenen Leerstellen werden durch weiter außen sitzende Elektronen wieder besetzt. Dabei wird die charakteristische Röntgenstrahlung oder bei der WDRFA auch Fluoreszenzstrahlung genannt, freigesetzt. Die Energie der Fluoreszenzstrahlung entspricht der Energiedifferenz der beiden Energieniveaus der verschiedenen Elektronenschalen. Die intensivste Energie wird erzeugt, wenn ein Elektron aus der K-Schale entfernt wird und das nachrückende Elektron aus der L-Schale nachrückt. Die dabei entstehende Strahlung

nennt sich  $K\alpha$  – Strahlung. Insgesamt ist die emittierte Fluoreszenzstrahlung abhängig von den Bindungsenergien der Elektronen in den jeweiligen Schalen bzw. Unterschalen.

Die entstandene Fluoreszenzstrahlung passiert den primären Kollimator und trifft danach auf den Analysatorkristall. Dieser dient als Monochromator. Die sekundäre Fluoreszenzstrahlung wird an diesem gebeugt und in verschiedene Wellenlänge zerlegt, die den verschiedenen Elementen zugeordnet werden können. Je nach Einstellung des Goniometerwinkels  $2\theta$  kann es an den Netzebenen des Analysatorkristalls zu einer Reflexion kommen. Die reflektierten Strahlen überlagern sich nur dann konstruktiv, d. h. sie verstärken sich, wenn die Bragg'sche Gleichung erfüllt ist:

Bragg'sche Gleichung:  $n \cdot \lambda = 2d \cdot \sin\theta$

$d$  = Netzebenenabstand des Analysatorkristalls

$n$  = ganzzahliges Vielfaches

$\theta$  = Winkel zwischen Primärstrahl und Netzebene

$\lambda$  = Wellenlänge

Nach passieren des sekundären Kollimators treffen die Strahlen auf ein Sequenzspektrometer, welches die am Kristall abgebeugten Strahlen wellenlängenspezifisch nacheinander mit einem Szintillationszähler detektiert. Der dabei theoretisch messbare Wellenlängenbereich umfasst das gesamte Spektrum der Röntgenstrahlung zwischen 25 nm und 0,01 nm, wobei allerdings meist nur der Bereich von 2 nm bis 0,02 nm für die Analyse von Bedeutung ist.

Die Nachweisgrenzen (NWG) sind von Element zu Element verschieden und können der Tabelle 3.1 entnommen werden.

**Tabelle 3.1:** Untere Nachweisgrenzen der RFA für Haupt- und Spurenelemente.

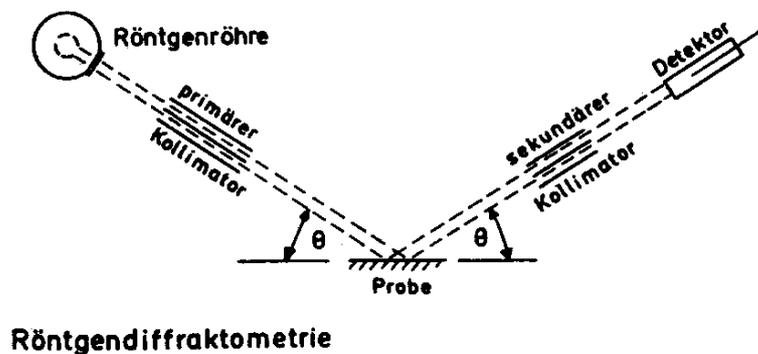
[mg/kg]	<b>SiO<sub>2</sub></b>	<b>TiO<sub>2</sub></b>	<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>MnO</b>	<b>MgO</b>	<b>CaO</b>	<b>Na<sub>2</sub>O</b>	<b>K<sub>2</sub>O</b>	<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>					
<b>NWG</b>	268	20	103	61	5	120	8	379	9	49					
[mg/kg]	<b>Sc</b>	<b>V</b>	<b>Cr</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Cu</b>	<b>Zn</b>	<b>Ga</b>	<b>Rb</b>	<b>Sr</b>	<b>Zr</b>	<b>Nb</b>	<b>Ba</b>	<b>Pb</b>	<b>Y</b>
<b>NWG</b>	5	5	5	5	10	5	5	5	5	5	10	5	10	10	5

### 3.4 Röntgendiffraktometrie (RDA)

Die Röntgendiffraktometrie ermöglicht eine Identifikation kristalliner Phasen.

Als Vorbereitung wurden die Proben aufgemahlen. Dieses Pulver wurde dann 1 mm dick auf einen runden Probenträger aufgetragen und in den Messkreis des Gerätes eingebracht. Gemessen wurde mit einem Röntgendiffraktometer der Firma Philips Mod. 1710. Alle Proben wurden im Winkelbereich von  $5 - 65^\circ 2\theta$  mit einer Schrittweite von  $0,2^\circ$  gemessen. Die Auswertung der Beugungsspektren erfolgte mit JCPDS Datenbanken.

Den schematischen Aufbau eines Röntgendiffraktometers zeigt die Abb. 3.4.



**Abb. 3.4:** Schematischer Aufbau eines Röntgendiffraktometers (HAHN-WEINHEIMER ET AL., 1984).

Die theoretische Grundlage der RDA ist die Beugung bzw. Reflexion von Röntgenstrahlen an den Netzebenen kristalliner Phasen. Die Strahlenquelle ist eine Röntgenröhre mit einer Kupferanode. Die Elektronen werden mit einer Spannung von 40 kV im Vakuum beschleunigt und treten in Wechselwirkung mit den Cu-Atomen der Anode. Ein Graphiteinkristall ist vor dem Detektor als Monochromator geschaltet, dessen Aufgabe es ist, Strahlung eines bestimmten, eng begrenzten Wellenlängenbereiches zu reflektieren, welche anschließend auf das Probenpulver trifft. Damit es zur Beugung der primären Strahlung kommen kann, muss die Bragg'sche Gleichung erfüllt sein (siehe auch Kap. 3.3).

Der Detektor (Zählrohr), der sich mit doppelter Winkelgeschwindigkeit ( $2\theta$ ) wie der Kristall um den Messkreis dreht, registriert die gebeugte Strahlung. Die wird wiederum in ein elektrisches Signal umgewandelt und nach Verstärkung der digitalen Datenverarbeitung zugeführt.

### 3.5 Ionenchromatographie (IC)

Mit der Ionenchromatographie wurden die auslaugbaren Konzentrationen an Chlorid, Sulfat und Nitrat bestimmt. Es war Ziel dieser Auslaugversuche das Salzbildungspotential durch Anionen zu quantifizieren.

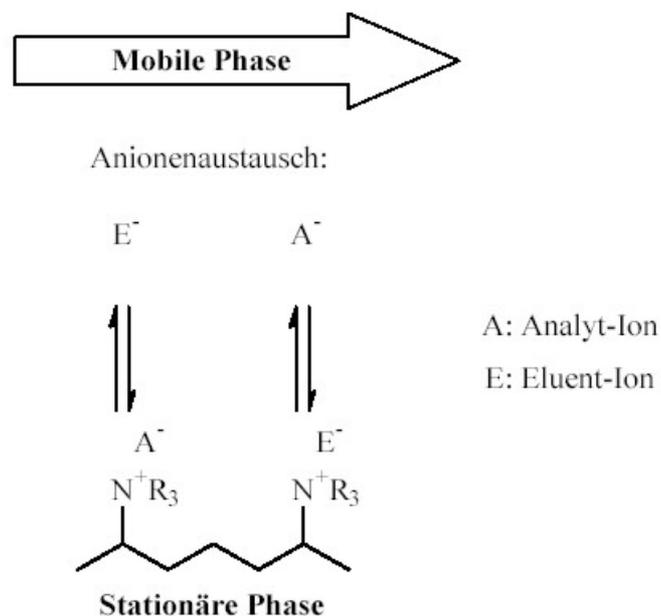
Dafür wurden die Proben nach DIN 38 414 Teil 4 aufbereitet. Um eine maximale Ausbeute an auslaugbaren Anionen zu bekommen wurden Pulverproben verwendet. Von diesem Probenpulver wurde 1 g auf 10 ml Wasser eingewogen und 24 Stunden lang mit einem Überkopfschüttler geschüttelt. Der ungelöste Rückstand wurde nach der Eluationsdauer zuerst abzentrifugiert und anschließend filtriert. Dieses Filtrat wurde nun auf seine Anionengehalte mit der Ionenchromatographie analysiert.

Unter Chromatographie versteht man im allgemeinen ein chemisch analytisches Trennverfahren mit nachfolgender Detektion. Der Trenneffekt in der Ionenchromatographie im speziellen beruht auf dem Ionenaustausch zwischen zwei Phasen. Eine Phase ist stationär und liegt als Säulenpackungsmaterial vor. Die zweite Phase, auch als Eluent bezeichnet, ist mobil und wird mit den darin gelösten Anionen (Analyten) durch die stationäre Phase gepumpt. Ändert man die Zusammensetzung des Eluenten während der chromatographischen Trennung, spricht man von Gradiententechnik; lässt man die Zusammensetzung des Eluenten konstant spricht man von isokratischer Arbeitsweise.

Ein Ionenchromatographie-System besteht aus den folgenden Komponenten: Pumpe, Vorratsgefäß(e) für die mobile(n) Phase(n) (Eluent), Injektor (Probenaufgabe), Trennsäule (stationäre Phase), Säulenofen, Suppressor und Detektor inklusive Datenaufnahme und Auswerteeinheit (SCHWEDT, 1994). Die Datenaufnahme und Verarbeitung erfolgt heute ausschließlich computergesteuert.

Der Ionenaustauschmechanismus in der Anionenchromatographie kann wie folgt beschrieben werden. Durch die stationäre Phase (chromatographische Säule) wird ein basischer Puffer gepumpt. Dieser Puffer belädt die stationäre Phase mit Hydroxidionen. Wird nun ein wässrige Probe mit Anionen (z.B. Chlorid) auf die Säule injiziert, so werden Chloridionen gegen Hydroxidionen ausgetauscht aufgrund des pH-Wert Unterschiedes zwischen Probe und Eluent. Wenn weiter Puffer durch die Säule fließt, werden die

Chloridionen wieder gegen Hydroxidionen ausgetauscht und schließlich zum Detektor transportiert. Die Zeit die dazu benötigt wird, heißt Retentionszeit. Da verschiedene Anionen durch ihr Ladungs-zu-Radius-Verhältnis unterschiedlich starke Affinitäten zur stationären Phase besitzen, kommt es zu einer zeitlichen Auftrennung dieser Anionen. Zusätzlich kann die Trennleistung und Selektivität über die Wahl der stationären Phase und durch die Wahl der Basenstärke und Konzentration der mobilen Phase kontrolliert werden. Alle Austauschmaterialien besitzen eine maximale Austauschkapazität und damit eine maximale Beladbarkeit mit Anionen und damit eine obere Grenze für die Gesamtmineralisierung der Probe. Typisch für 250 x 4 mm Säulen sind 1 g/L. Die Abb. 3.5 zeigt eine schematische Darstellung des Anionenaustausches.



**Abb. 3.5:** Schematische Darstellung des Ionenaustauschprozesses in der Ionenchromatographie für den Anionenaustausch (SCHWEDT, 1995).

Für die Detektion in der Ionenchromatographie hat sich der Leitfähigkeitsdetektor durchgesetzt. Dieser ist jedoch nur bei vorgeschalteter Suppression der Gesamtleitfähigkeit einsetzbar. Damit ist man in der Pufferwahl für die mobile Phase auf solche beschränkt, die sehr einfach in nichtleitfähige Produkte überführt werden können. Diese sind Natriumtetraborat, Natriumcarbonatpuffer, sowie Kaliumhydroxid. In den heute weit verbreiteten elektrochemischen Suppressoren werden die Kationen des Puffers (Kalium oder Natrium) gegen Wasserstoffionen ausgetauscht und somit entsteht aus Natriumtetraborat → nicht leitfähige Borsäure, aus Carbonaten nicht leitfähige Kohlensäure und aus Hydroxiden Wasser. Gleichzeitig wird den Anionen ein

Wasserstoffion dazugegeben, wodurch sich dessen Detektierbarkeit stark erhöht. Dadurch wird es erreicht, die eigentlich im Gegensatz stehen Methoden (Puffer in Austauschchromatographie mit Leitfähigkeitsdetektion) zu verbinden und trotzdem geringe Konzentrationen nachweisen zu können. Es ist sehr wichtig, dass für quantitative Analysen, die Leitfähigkeitszelle temperiert ist, da die Leitfähigkeit mit der Temperatur ca. 1,7%/Grad schwankt. Die Leitfähigkeitsdetektion ist für Ionen eine sehr unspezifische Technik, d.h. man kann aus dem Signal nicht unterscheiden ob es durch Chlorid oder Sulfat erzeugt wurde. Eine Zuordnung der Signale ist damit einzig über die spezifische Retentionszeit gesichert und kann nur durch Verwendung eines Säulenofens, einem spezifischen Zeitfenster gehalten werden.

Der Arbeitsbereich in der Ionenchromatographie erstreckt sich zwischen der Nachweisgrenze (ca. 0.5 mg/L) und der Gesamtbeladbarkeit der Säule bei Anwesenheit mehrerer Anionen. Ist jedoch nur ein Anion vorhanden, kann die obere Grenze auch durch die Nicht-Linearitätsbeziehung der Leitfähigkeitsdetektion bestimmt werden. Über die injizierte Probenmenge (typisch 1µl-200µl) kann die Nachweisgrenze nach oben oder unten verschoben werden, solange die Säulenkapazität für die jeweilige Säule nicht überschritten ist.

Für die Analyse der Proben aus dieser Arbeit wurde eine hochkapazitive Säule verwendet. Diese garantiert eine höhere Beladbarkeit unter Erhalt der Trennleistung und ermöglicht somit auch geringe Nitratkonzentrationen neben hohen Chlorid und/oder Sulfatkonzentrationen zu quantifizieren. Diese Säulen bedingen karbonatfreie Kalilauge als Eluent, da Karbonat ebenfalls auf diesen Säulentypen als Peak detektiert werden kann. Karbonat erschien bei den in dieser Arbeit verwendeten Bedingungen als Schulter am Chloridpeak. Versuche, das Karbonat über ansäuern mit einer nicht-mineralischen Säure (Methansulfonsäure) auszutreiben, schlugen fehl, da das Anion dieser Säure schlussendlich die Chromatogramme dominierte.

### 3.6 Quecksilberdruckporosimetrie

Durch die Quecksilberporosimetrie werden unter anderem die offene Porosität in Vol.-% und die Porenradienverteilung bestimmt. Die Porenradienverteilung gibt den Anteil unterschiedlicher Porengrößen (Porenklassen) am Porenvolumen eines Gesteins wieder. Die Messung erfolgt mit dem Porosimeter Autopor II 9220 der Firma Micromeritics. Dieses Gerät ermöglicht die Erfassung von Porenradien zwischen  $2,23\text{-}2,23 \cdot 10^5$  nm. Als Vorbereitung wurden die Proben mit einer Kneifzange auf eine Größe von 2-4 mm zerkleinert und in die Penetrometer eingebracht.

Die Quecksilberdruckporosimetrie nutzt die physikalische Eigenschaft des Quecksilbers (Hg), dass dieses eine nicht benetzende Flüssigkeit mit einem Randwinkel von über  $90^\circ$  ist. Im Gegensatz zu Wasser wird Hg somit nicht von porösen Materialien aufgenommen. Um die Poren mit Hg zu füllen, muss vielmehr ein äußerer Druck angewandt werden. Nach WASHBURN (1921) ergibt sich folgende Beziehung zwischen dem Porenradius und dem aufgewendeten Druck:

$$r = -2\sigma \cdot \cos\theta / p$$

$r$  = Porenradius [ $\mu\text{m}$ ]

$\sigma$  = Oberflächenspannung [ $\text{N/m}$ ]; für Hg = 0,485

$\theta$  = Randwinkel [ $^\circ$ ]; für Hg =  $141,3^\circ$

$p$  = äußerer Druck [ $\text{Mpa}$ ]

Die Gesamtporosität stellt einen Wert für die offene, d.h. von außen zugängliche Porosität im verwendeten Druckbereich dar. Es fehlt das Porenvolumen, das durch den Fülldruck bereits zu Beginn der Messung gefüllt ist sowie die Bereiche, die mit dem Maximaldruck nicht erreicht werden können (hier: Poren  $< 3,8 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ ).

Mit der Quecksilberdruckporosimetrie kann zusätzlich die Reindichte einer Probe bestimmt werden. Die Reindichte entspricht der Dichte nach DIN 52102, wenn am Ende der Messung alle Poren mit Hg gefüllt sind und kein geschlossener Porenraum mehr vorhanden ist.

Die Rohdichte ist infolge des bereits herrschenden Druckes der Hg-Säule etwas zu hoch bestimmt, da die Poren bis zu einem diesem Druck entsprechenden Radius bereits mit

Quecksilber gefüllt sind und das Porenvolumen um den Betrag dieser Hohlräume zu gering bestimmt worden ist.

Die gemessene Porenradienverteilung wird in folgende Bereiche gegliedert:

> 10.000 nm	Luftporen
30 nm – 10.000 nm	Kapillarporen
< 30 nm	Gelporen.

### 3.7 Bestimmung des dynamischen E-Moduls

Der dynamische Elastizitäts-Model (E-Modul) beschreibt die Verformbarkeit des Mörtels und mögliche auftretende Spannungen infolge von Schwinden oder Wärmedehnung können beurteilt werden.

Der dynamische E-Modul wird an einem Steinkamp Ultrasonic Tester der Firma Wekop (DIN/ISO 8047) mit dem Grindo-Sonic-Verfahren an den einzelnen Probenteilen ermittelt. Das Messverfahren arbeitet mit Impulserrregung und Frequenzanalyse. Der Probekörper wird durch einen leichten mechanischen Impuls in Longitudinalrichtung angeregt. In der Phase des freien Ausschwingens des Körpers wird die Eigenfrequenz analysiert und als Laufzeit von zwei Perioden in  $\mu\text{s}$  auf einem Display ausgegeben. Mit der Kenntnis der Abmessungen, der Dichte und der Laufzeit kann der dynamische E-Modul nach folgenden Formeln errechnet werden

$$E_{\text{dyn.}} = [k * (v_s)^2 * \rho] / 1000$$

$$\text{wobei: } v_s = (l / t_s) * 1000 \quad \text{und}$$

$$k = (1 + \mu) * (1 - 2\mu) / (1 - \mu)$$

$$v_s = \text{Schallgeschwindigkeit [mm/s]}$$

$$l = \text{Länge der Probe [mm]}$$

$$t_s = \text{gemessene Schalllaufzeit [\mu m]}$$

$$\mu = \text{Querkontraktionszahl, hier 0,2 (für Beton)}$$

$$\rho = \text{Dichte [g/cm}^3\text{]}$$

### 3.8 Bestimmung der Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit gibt die Belastbarkeit eines Gestein an.

Die Bestimmung der Druckfestigkeit erfolgt nach DIN 1048 Teil 2. Dabei werden die einzelnen Bohrkernproben mit einer Universalprüfmaschine der Firma Instron, Modell 6025, bis zum Bruch gefahren.

### 3.9 Ultraschallmessung

Die Ultraschallmessung wurde eingesetzt, um Veränderungen der an mörtelgefüllten Marmorhohlzylindern in verschiedenen Erhaltungszuständen festzustellen (s. Kap. 8: Fallstudie 1).

Die folgenden Ausführungen wurden zum großen Teil aus der Arbeit von KOCH (2000) übernommen.

Die Ultraschallmessung wurde mit dem Ultraschall-Laufzeit-Verfahren ermittelt. Es handelt sich dabei um ein zerstörungsfreies Messverfahren und eignet sich vielfältig zur Materialprüfung. Im Bereich der Natursteinprüfung wird das Verfahren zur Beurteilung der mechanischen Materialeigenschaften herangezogen und eignet sich auch zur Bestimmung verwitterungsbedingter Materialveränderungen (z.B. KÖHLER, 1988; ZEZZA, 1990; BLUM, 1993). Das Verfahren wird ausführlich diskutiert und beschrieben z.B. in KRAUTKRÄMER & KRAUTKRÄMER (1986) und BLUMENAUER (1989).

Als Ultraschall wird Schall mit einer Frequenz über 20 kHz bezeichnet. Schallwellen sind mechanische Schwingungen und im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen an ein elastisches Medium gebunden. Sind Schwingungsrichtung und Schallausbreitungsrichtung identisch, spricht man von Longitudinal-, Kompressions- oder P-Wellen. Schwingen die Teilchen senkrecht zur Ausbreitrichtung, handelt es sich um Transversal-, Scher- bzw. S-Wellen.

In dieser Arbeit wurde die Kompressionswellengeschwindigkeit erfasst. Dabei befindet sich der zu untersuchende Probenkörper zwischen zwei Schallköpfen, dem Sender und Empfänger. Gemessen wird der zeitliche Abstand zwischen dem Impuls des Senders und

das erste Auftreten einer Welle am Empfänger. Grundbedingung dabei ist, dass sich im Gesteinsinneren mindestens eine vollständige Welle ausbreitet. Folgende Bedingung muss eingehalten werden (DÜLLMANN, 1976):

$$d/l > 1$$

d: Probedurchmesser [mm]  
l: Wellenlänge [mm]

Mit

$$l = v/f$$

v: Schallgeschwindigkeit [km/s]  
f: Frequenz der Prüfköpfe

wird die Wellenlänge von der Schallgeschwindigkeit und von der Messfrequenz bestimmt. Je kleiner die Probe dimensioniert ist, desto höher sollte also die Messfrequenz bezüglich der erforderlichen Wellenlänge sein. Hier wurde mit einer Messfrequenz >350 kHz gearbeitet.

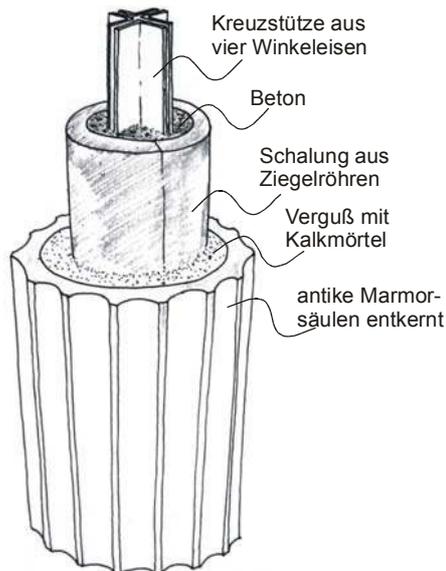
Mit der Kenntnis der gemessenen Zeit, die eine Welle zum Durchqueren einer Probe braucht, lässt sich die Wellengeschwindigkeit errechnen:

$$V_p = d/t_p$$

$V_p$ : Kompressionswellengeschwindigkeit [km/s]  
d: Probedurchmesser [mm]  
 $t_p$ : Laufzeit der Kompressionswelle [ $\mu$ s]



Die Bohrkerne BK VI und BK VII wurden aus dem rechten Gebäudeteil gebohrt, welcher nach dem zweiten Weltkrieg nach einem Bombentreffer teilweise wieder hergestellt werden musste. Der Bohrkern VI stammt aus einer in den 50er Jahren des 20ten Jahrhunderts wiederhergestellten Säule und BK VII wurde aus der Rückwand entnommen.

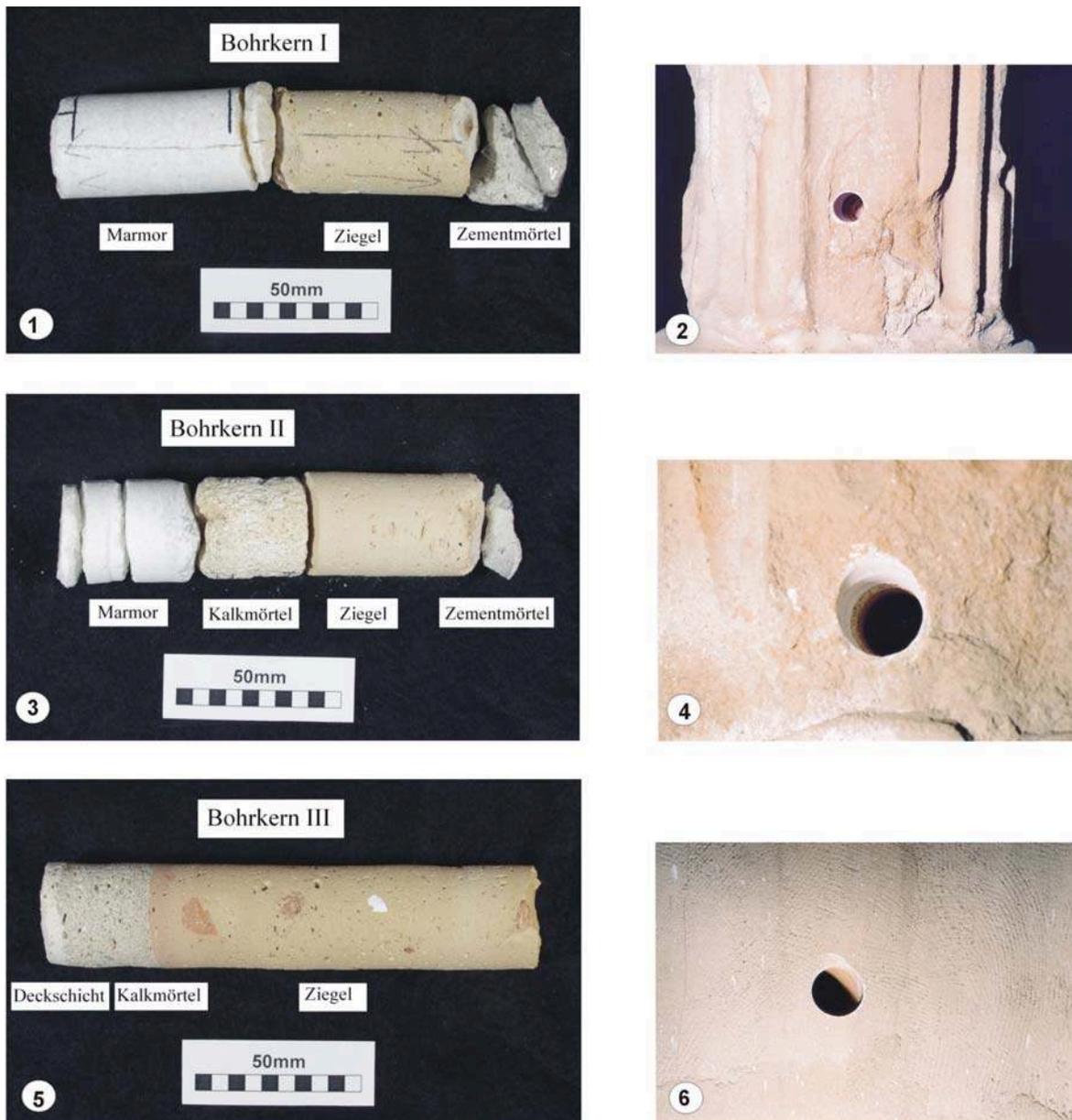


**Abb.4.2:** Aufbau der Marmorsäulen.

Der normale Aufbau einer „originalen“ Marmorsäule ist in Abb. 3.2 dargestellt:

In die entkernte Marmorsäule wurde eine Schalung aus Ziegelröhren eingebracht. Der Zwischenraum von Marmor und Ziegel wurde mit einem Kalkmörtel vergossen. Für eine größere Stabilität des Tores ist in der Mitte der Säule eine Stahlbewehrung mittels einer Kreuzstütze bestehend aus vier Winkelleisen eingebracht worden. Der restliche Zwischenraum wurde mit Beton vergossen.

Ein solcher Aufbau ist von den entnommenen Bohrkernen lediglich beim Bohrkern II zu beobachten (s. Tafel 1, Abb. 3).

**Tafel 1: Bohrkern I-III und ihre entsprechenden Entnahmepunkte**

**Abb. 1:** Bohrkern I, 4.Pfeiler von links, Bohrkerntiefe 140 mm, Ø 30 mm, Stahl angebohrt.

**Abb. 2:** Bohrkernloch I.

**Abb. 3:** Bohrkern II, 5.Pfeiler von links, Bohrkerntiefe 135 mm (äußere Beschädigung ca. 0,5 mm), Stahlpfeilertiefe ca. 140 cm wie bei BK I, Ø 30 mm.

**Abb. 4:** Bohrkernloch II.

**Abb. 5:** Bohrkern III, Rückwand hinter zweiter Säule links, Bohrkerntiefe 144 mm, Ø 30 mm.

**Abb. 6:** Bohrkernloch III.

**Tafel 2: Bohrkern IV-VI und ihre entsprechenden Entnahmepunkte**



**Abb. 1:** Bohrkern IV, 1.Pfeiler von links, Bohrkerntiefe 94 mm, Ø 30 mm.

**Abb. 2:** Bohrkernloch IV.

**Abb. 3:** Bohrkern V, 2.Pfeiler von links, Bohrkerntiefe 155 mm, Ø 30 mm.

**Abb. 4:** Bohrkernloch V.

**Abb. 5:** Bohrkern VI, 3. Säule rechts hinten, Bohrkerntiefe 118 mm, Ø 30 mm.

**Abb. 6:** Bohrkernloch VI.

**Tafel 3: Bohrkern VII mit Entnahmepunkt und Probestück vom Pergamonaltar**



**Abb. 1:** Bohrkern VII, Rückwand hinter 3. Säule von links, Bohrkerntiefe 120 mm, Ø 30 mm.

**Abb. 2:** Bohrkernloch VII.

**Abb. 3:** Bohrkern VII Außenputz.

**Abb. 4:** Stück vom Pergamonaltar.

## 5. Gefügekundliche und mineralogische Eigenschaften

In diesem Kapitel werden gefügekundliche Eigenschaften der verschiedenen Materialien der einzelnen Bohrkerne beschrieben, die mit Hilfe der Dünnschliffmikroskopie und der Rasterelektronenmikroskopie ermittelt worden sind. Daneben werden Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse und der Röntgendiffraktometrie und der Anionenmessung dargestellt.

Untergliedert wurde dieses Kapitel in den Aufbau von 1920-1930 und von den Aufbau nach dem Bombentreffer in den 50er Jahren des 20ten Jahrhunderts. Dabei wird der Säulenaufbau verschiedener Gebäudesituationen näher beschrieben.

Am Ende dieses Kapitels wird auf die Anionenmessung (Sulfat, Nitrat und Chlorid) mit der Ionenchromatographie näher eingegangen.

Um die RFA-Ergebnisse nicht bei jeder Probe extra angeben zu müssen, werden diese an dieser Stelle vorweggenommen und in den Tabellen 5.1 und 5.2 dargestellt. So ist auch ein direkter Vergleich zwischen den einzelnen Proben möglich. Die Summe der Hauptkomponenten ist in einigen Proben deutlich kleiner als 100%, da mit dieser Methode das CO<sub>2</sub> nicht mit erfasst werden kann. Die Diagramme der RDA werden in der Zusammenfassung dieses Kapitels (Kap.6) dargestellt.

**Tabelle 5.1:** Ergebnisse der RFA-Messung (Hauptkomponenten).

Probenname		SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Summe
		(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)
Marmor	- BK I	<LLD	0,01	0,1	0,1	0,0	0,2	55,8	0,1	<LLD	0,01	56,3
	- BK II	7,6	0,02	0,2	0,1	0,0	0,2	51,5	0,1	<LLD	0,01	59,8
Deckschichten-	BK IV	4,7	0,06	0,9	0,3	0,1	15,1	31,9	0,4	0,9	0,02	54,3
	- BK V	6,2	0,08	1,4	0,3	0,1	14,4	34,8	0,7	0,7	0,03	58,6
	- BK VI	25,3	0,19	3,1	1,6	0,1	1,6	38,5	0,3	0,8	0,05	71,5
	- PA	7,5	0,08	1,4	0,3	0,0	14,2	35,3	0,7	0,1	0,02	59,6
Kalkmörtel	- BK II	66,3	0,10	2,3	0,7	0,0	1,1	16,8	0,3	0,5	0,04	88,1
	- BK III	75,6	0,09	2,1	0,5	0,0	0,3	10,4	0,4	0,6	0,03	90,0
	1 - BK IV	63,2	0,12	2,3	0,8	0,0	0,6	17,4	0,4	0,8	0,03	85,7
	2 - BK IV	73,6	0,11	2,0	0,5	0,0	0,2	11,4	0,5	1,1	0,03	89,4
	- BK V	65,2	0,08	2,3	0,6	0,0	1,0	15,7	0,3	0,5	0,03	85,8
	- BK VII RW	81,7	0,11	2,1	0,5	0,0	0,2	8,2	0,4	0,7	0,03	94,0
	- BK VII AP	83,2	0,10	1,9	0,5	0,0	0,2	6,9	0,4	0,7	0,03	93,9
Zementmörtel	- BK I	60,9	0,15	2,9	1,5	0,0	0,5	19,9	0,3	0,6	0,04	86,8
	- BK II	64,5	0,14	2,5	0,9	0,0	0,5	20,3	0,3	0,5	0,03	89,6
	- BK V	61,4	0,14	2,8	1,0	0,0	0,7	21,3	0,3	0,4	0,04	88,2
	- BK VI	66,1	0,11	3,1	1,2	0,1	0,4	16,3	0,5	0,9	0,12	88,7
	- PA	65,7	0,14	3,3	1,0	0,0	0,4	18,9	0,5	0,7	0,09	90,8
Ziegel	- BK I	59,0	0,58	8,6	3,4	0,1	2,1	10,2	0,8	2,4	0,11	87,2
	- BK II	56,4	0,66	10,9	4,4	0,1	2,4	11,6	0,8	2,9	0,13	90,3
	- BK III	60,4	0,56	7,9	3,1	0,1	1,8	8,4	0,6	2,2	1,24	86,3
	- BK V	60,8	0,68	10,7	4,3	0,1	2,5	11,9	0,8	3,0	0,12	94,8
	- PA	63,0	1,20	15,1	5,0	0,1	1,9	8,4	0,5	3,1	0,14	98,5

**Tabelle 5.2:** Ergebnisse der RFA-Messung (Spurenelemente).

Probenname		Sc	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Rb	Sr	Zr	Nb	Ba	Pb	Y
		(ppm)														
Marmor	- BK I	28	6	6	<LLD	2	16	9	1	3	82	14	1	12	4	<LLD
	- BK II	21	8	6	55	1	<LLD	9	1	2	92	17	0	32	6	0
Deckschichten	- BK IV	19	11	6	9	2	<LLD	549	10	15	200	26	<LLD	524	9	2
	- BK V	23	13	10	5	4	<LLD	340	8	19	164	30	2	301	11	3
	- BK VI	27	26	23	8	10	16	43	3	27	598	75	3	323	17	10
	- PA	22	15	7	3	1	<LLD	2185	38	1	198	32	4	996	14	5
Kalkmörtel	- BK II	8	20	13	3	8	35	12	3	17	183	62	3	131	9	6
	- BK III	8	10	11	<LLD	5	15	9	2	22	185	80	2	186	7	4
	1 - BK IV	3	18	16	36	6	3	13	4	24	456	85	4	129	6	7
	2 - BK IV	5	14	13	14	2	1	7	4	35	182	93	1	124	24	4
	- BK V	10	16	13	17	7	33	15	4	19	168	46	2	136	10	4
	- BK VII RW	6	13	13	24	4	<LLD	10	1	26	65	122	4	139	8	5
	- BK VII AP	1	7	10	<LLD	6	1	19	4	23	216	96	2	190	13	3
Zementmörtel	- BK I	11	19	12	3	5	2	20	5	20	334	98	3	228	4	8
	- BK II	15	28	15	10	5	4	12	5	19	320	89	5	191	2	7
	- BK V	17	20	15	14	6	11	16	6	20	334	57	2	192	8	5
	- BK VI	16	17	16	15	4	11	24	5	22	408	76	1	312	15	6
	- PA	12	25	19	1	8	4	18	4	28	476	55	4	174	5	8
Ziegel	- BK I	13	59	60	5	24	18	51	10	88	271	242	15	384	21	27
	- BK II	22	86	72	22	35	25	67	15	108	322	218	15	427	35	25
	- BK III	9	62	55	9	25	26	42	11	77	201	273	13	357	17	25
	- BK V	19	76	72	32	35	27	62	15	106	332	235	15	452	15	28
	- PA	16	131	103	14	46	25	86	21	131	243	268	32	507	20	31

&lt;LLD = unterhalb der Nachweisgrenze.

## 5.1 Probenmaterial des Aufbaus von 1925-1929

Im folgenden werden die Bohrkerne beschrieben, die vom Aufbau aus den 20er Jahren stammen und durch einen Bombentreffer im zweiten Weltkrieg nicht oder kaum beschädigt worden sind. Gegliedert wird dieses Kapitel nach den einzelnen Gebäudesituationen. Die Bohrkerne wurden alle aus der 2. Ebene im linken Teil des Markttores von Milet entnommen (s Kap 4).

### 5.1.1 Marmorsäule: Bohrkern I (BK I)

Der Bohrkern I wurde an der vierten Säule von links entnommen. Es handelt sich hierbei um eine originale Marmorsäule. Der Aufbau von BK I weicht allerdings von dem normalen Säulenaufbau ab (s. Kap. 4). Zwischen der antiken Marmorsäule und der Ziegelverschalung fehlt der Verguss mit Kalkmörtel (s. Tafel 1, Abb. 1). Dies könnte damit erklärt werden, dass die entkernte Marmorsäule eine relativ dicke Wandung von 60 mm besitzt und die Ziegelverschalung direkt an die Säule angepasst wurde. Der Ziegel und der Marmor besitzen keinen Verbund untereinander, wie endoskopische Untersuchungen gezeigt haben. Der Zwischenraum ist vermutlich so klein, dass der Verguss des Kalkmörtels an dieser Entnahmestelle nicht zwischenfließen konnte. Womöglich ist er aber an anderen Stellen vorhanden. Um dies mit Sicherheit sagen zu können, müsste eine weitere Bohrung an dieser Säule vorgenommen werden. In Tafel 4 wurden einige Dünnschliff- und REM-Aufnahmen für die Materialien aus Bohrkern I dargestellt.

#### 5.1.1.1 BK I – Marmor

Der Marmor aus BK I besitzt eine weiße Farbe. Das Korngefüge ist sehr ungleichmäßig. Es handelt sich um eine bimodale Korngrößenverteilung. Grobkörnige Calcit-Kristalle befinden sich in einer sehr feinkörnigen Matrix. Die Korngrenzen sind gezackt. Die einzelnen Calcitkörner lösen sich auf und es bilden sich feinkörnige Rekristallite (s. Tafel 4, Abb. 1). Fast alle Körner besitzen eine undulöse Auslöschung. Zwischen den Körnern sind mit dem Rasterelektronenmikroskop Mikrorisse festzustellen (s. Tafel 4, Abb. 2).

Die RDA-Messung zeigt, dass der Marmor aus BK I aus reinem Calcit besteht. Durch die RFA-Messung wird dieses bestätigt. Die Summe aller gemessenen Oxide außer CaO beträgt lediglich 0,46 %. Davon sind 0,2 % MgO. Dies bedeutet, dass es einen sehr geringen Anteil von Dolomit in diesem Marmor gibt. SiO<sub>2</sub> liegt unterhalb der Nachweisgrenze.

### 5.1.1.2 BK I – Ziegel

Die Farbe des Ziegels aus Bohrkern I ist gelblich bis leicht orange. In dem Ziegel sind eckige bis leicht abgerundete Quarzkörner zu finden. Die Korngröße variiert von zumeist Silt bis Feinsand. Mit der Röntgendiffraktometrie konnten neben Quarz die Minerale Diopsid, Anorthit und Albit nachgewiesen werden. Diese Minerale bilden die Matrix des Ziegels und sind die Reaktionsprodukte des Brennvorgangs, wobei die Tonminerale und eventuell vorhandener Calcit bzw. Dolomit verbraucht werden. Im Rasterelektronenbild ist zu erkennen, dass die Matrix einen Saum um die Quarzkörner bildet (s. Abb. 5.1). Dabei könnte es sich um einen Reaktionsaum handeln. Die Hauptelemente, die mit der EDX unter dem Rasterelektronenmikroskop gemessen worden sind, sind Si, Ca, Al, Mg und K (s. Abb. 4.2). Dabei könnte es sich um eine Mischung von Diopsid und Alkalifeldspäten handeln. Die einzelnen Kristalle konnten nicht einzeln aufgelöst werden. Die RFA-Analyse zeigt einen relativ großen Anteil von CaO (11,56 %). Es kann davon ausgegangen werden, dass der Großteil als Karbonat im ungebrannten Ton- bzw. Mergel-Gemisch vorlag.

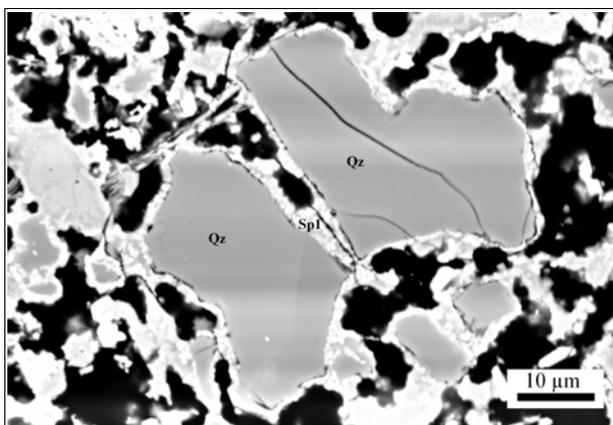


Abb. 5.1: Rasterelektronenbild (Rückstreuungsbild) vom Ziegel aus BK I.

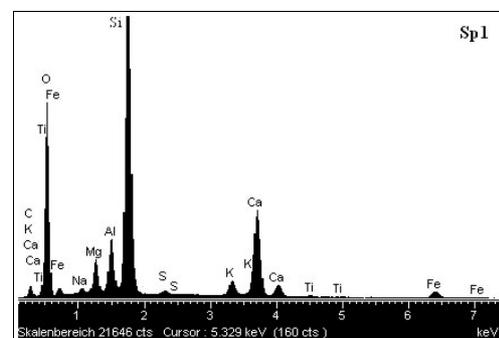


Abb. 5.2: EDX-Aufnahme vom "Reaktionssaum" um die Quarzkörner im Ziegel.

### 5.1.1.3 BK I - Zementmörtel

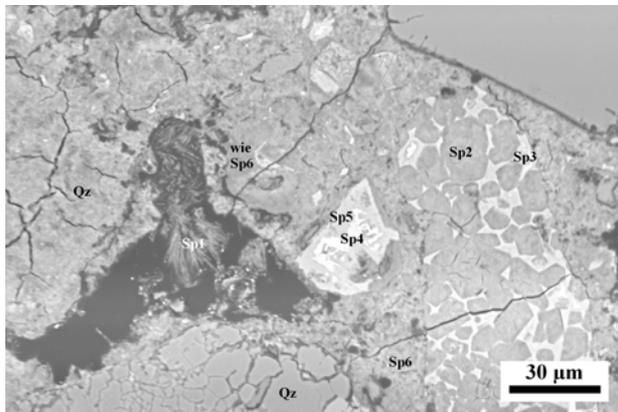
Bei diesem Probenstück handelt es sich um einen grauen Zementmörtel. Der Zuschlag besteht hauptsächlich aus gerundeten bis leicht eckigen Quarzkörnern. Vereinzelt sind jedoch auch Feldspäte vorhanden. Im Rasterelektronenbild (Rückstreuelektronenbild) erscheinen die Feldspäte etwas heller als der Quarz. Die Korngröße des Zuschlages liegt im Fein bis Mittelsand-Bereich. Nach REM-Untersuchungen ist im Bindemittel eine leichte Rissbildung zu erkennen. Im Dünnschliff sind deutlich kugelförmige Belitnester und auch CSH-Phasen (Calciumsilikathydrate) zu erkennen (s. Tafel 4, Abb. 4). Die Calciumsilikathydrate entstehen bei der Hydratation der Calciumsilikate und besitzen eine variable Zusammensetzung. Sie bestehen aus feinsten Nadeln und sind in einem dicht gepackten Gefüge vernetzt. Im Dünnschliff erscheinen sie als ein nebulöser Überzug. Aufgrund der geringen Phasengröße können sie röntgenographisch nicht nachgewiesen werden (röntgenamorph) (STARK & WICHT, 2000). Es handelt sich um ein hydraulisches Bindemittel.

Der Verbund von Zuschlag zu Bindemittel erscheint sehr ausgeprägt. In den Poren ist häufig eine sekundäre Ettringitbildung zu beobachten (s. Tafel 4, Abb.4). Diese wurde ebenfalls mittels REM- EDX nachgewiesen (s. Abb. 4.3 + Abb. 4.4). In der Röntgendiffraktometeraufnahme konnte Ettringit nicht eindeutig erfasst werden. Daraus folgt, dass es wahrscheinlich in nur geringen Mengen vorhanden ist.

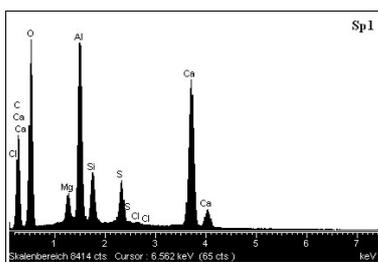
Die Klinkerphasen Belit ( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$ ) bzw. Alit ( $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 = \text{C}_3\text{O}$ ) sind auch im Rasterelektronenmikroskop deutlich zu erkennen (s. Abb. 4.3). Die Alit-Kristalle weisen vielfach einen sechseckigen Querschnitt auf (20-60  $\mu\text{m}$ ) und sind häufig miteinander großflächig verwachsen. Belit trifft man meist in Nestern angereichert oder seltener homogen verteilt als rundliche Kristalle (10-30  $\mu\text{m}$ ) an (STARK & WICHT, 2000). Aluminat ( $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$ ) und Aluminatferrit ( $4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_2(\text{A},\text{F})$ ) bilden die im Rasterelektronenbild helle Zwischenmasse/Matrix. Im Klinker ist die Ferritphase feinstkörnig und meist xenomorph ausgebildet sowie mit der Aluminatphase verwachsen (vgl. STARK & WICHT, 2000).

In Abb. 5.5 ist das EDX-Spektrum einer Klinkerphase abgebildet. Ob es sich dabei um Belit oder Alit handelt, kann hier nicht eindeutig unterschieden werden. Für Alit spräche die Form der einzelnen Kristalle im Rasterelektronenbild und der relativ große Peak von Mg im EDX-Spektrum. Letzteres gehört mit zu den wichtigsten Fremdoxiden, die in das Kristallgitter von Alit eingebaut werden können (STARK & WICHT, 2000). Dabei können

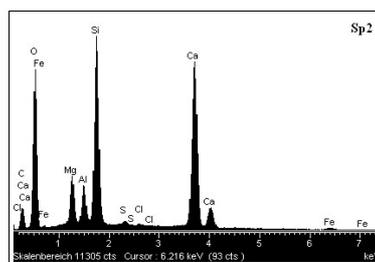
0,3-2,1 % Mg eingebaut werden. Im Belit wird es nicht so gerne eingebaut. Gegen Alit spricht das geringe Verhältnis von Ca zu Si im EDX-Spektrum.



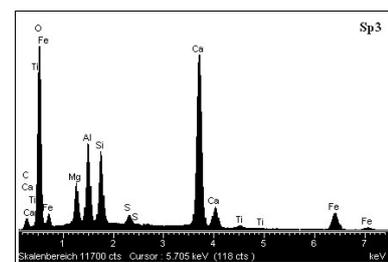
**Abb. 5.3:** Rasterlektronenbild (Rückstreuungselektronenbild) aus dem Zementmörtel von BK I.



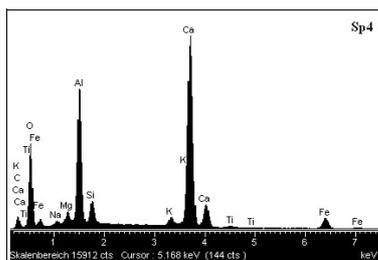
**Abb. 5.4:** EDX-Spektrum 1 aus Abb. 4.3 (Ettringit).



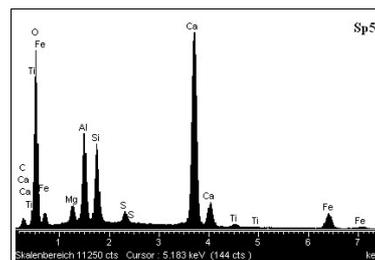
**Abb. 5.5:** EDX-Spektrum 2 aus Abb. 4.3 (Alit oder Belit).



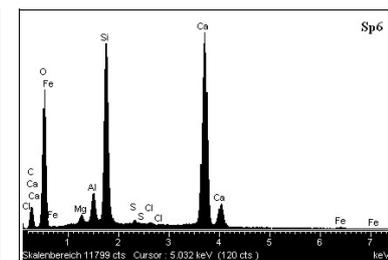
**Abb. 5.6:** EDX-Spektrum 3 aus Abb. 4.3 (Matrix im Klinkerrest).



**Abb. 5.8:** EDX-Spektrum 4 aus Abb. 4.3.

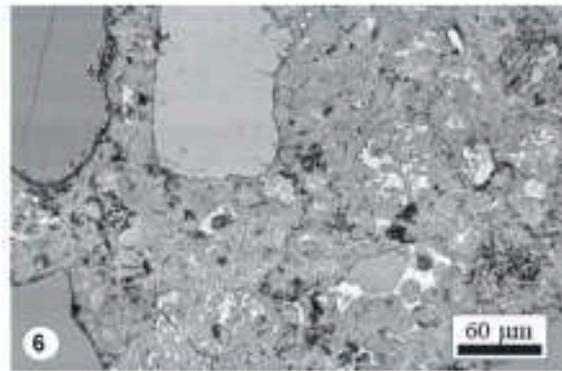
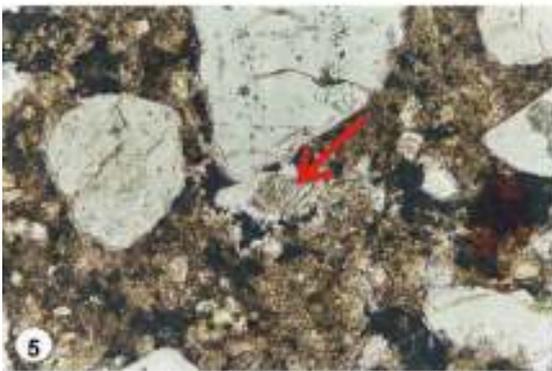
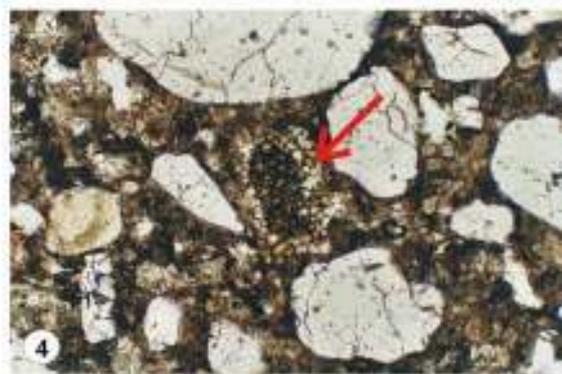
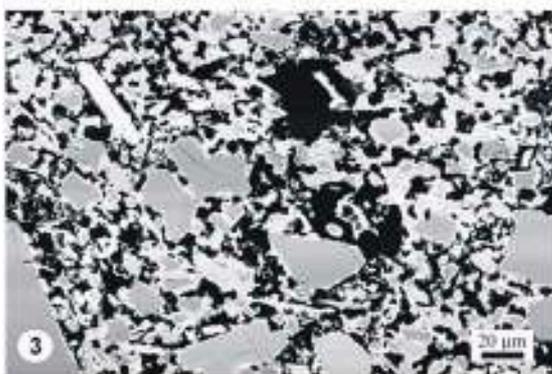


**Abb. 5.7:** EDX-Spektrum 5 aus Abb. 4.3.



**Abb. 5.9:** EDX-Spektrum 6 aus Abb. 4.3 (Bindemittel).

Die RFA-Messung zeigt als Hauptkomponenten hauptsächlich  $\text{SiO}_2$  (60,9 %) und  $\text{CaO}$  (19,94 %). Daneben tritt  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit 2,9 % und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  mit 1,47 % auf. Der  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalt ist im Vergleich zu den anderen Mörteln (BK 6 ausgenommen) um 0,4-1 % höher. Am Foto des Bohrkernes (siehe Fototafel 1) ist am Ende dieses Probenstückes ein bräunlicher Überzug zu erkennen. Dabei könnte es sich um einen Hämatitüberzug handeln, der im Kontakt zu dem Bewehrungsstahl stand. Dies könnte auch den höheren Eisengehalt der Probe erklären.

**Tafel 4: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern I**

**Abb. 1:** Auflösungs- und Rekristallisationsgefüge des Marmors aus Bohrkern I; Durchlicht + Pol., Bildbreite 3,94 mm.

**Abb. 2:** Mikrorisse im Marmor aus Bohrkern I; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 3:** Reaktionssäume um Quarzkörner im Ziegel aus Bohrkern I; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 4:** Belitnest im Kalkmörtel aus Bohrkern I; Durchlicht, Bildbreite 1,52 mm.

**Abb. 5:** Sekundäre Ettringitbildung in einer Pore im Zementmörtel aus Bohrkern I; Durchlicht, Bildbreite 0,79 mm.

**Abb. 6:** Übersichtsbild des Zementmörtels aus Bohrkern I; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

### 5.1.2 Marmorsäule: Bohrkern II (BK II)

Der Bohrkern II wurde aus der fünften Säule von links entnommen. Er weist den typischen Aufbau einer verbauten Marmorsäule auf, wie in Kap. 3.1 beschrieben. Der Vergleich mit Bohrkern I zeigt, dass hier die Wandung des Marmors wesentlich schmäler ist. Im BK I ist der Marmor 60 mm dick, in BK II nur 35 mm. Der Raum zwischen entkernter Marmorsäule und Ziegelverschalung ist somit so groß, dass der Kalkmörtel im Gegensatz zu Bohrkern I eindringen konnte. Die Tafeln 5a und 5b zeigen Dünnschliff- und REM-Aufnahmen der Materialien aus Bohrkern II.

#### 5.1.2.1 BK II – Marmor

Der Marmor aus Bohrkern II ist weiß. Bei der Dünnschliffbetrachtung ist festzustellen, dass zwei verschieden ausgebildete Gefügebereiche in dem Marmor vorhanden sind.

Im Inneren Teil der verbliebenen Marmorwandung der Säule ist das Korngefüge relativ gleichkörnig. Die grob- bis mittelkörnigen Calcitkörner sind polygonal ausgebildet und besitzen equilibrierte Korngrenzen (s. Tafel 5a, Abb. 1). Dies weist darauf hin, dass der gefügeprägende Prozess eine statische Rekristallisation repräsentiert. Mit dem Rasterelektronenmikroskop ist eine leichte Mikrorissbildung zwischen den Körnern zu erkennen (s. Tafel 5a, Abb. 3).

Im äußeren Bereich des Marmores gibt es eine Kornverkleinerung. Neben groben Calcitkörnern gibt es feinkörnige Calcitkörner (s. Tafel 5a, Abb. 2). Die Korngrenzen sind geschwungen bis eckig. Die Zwillinge bzw. Spaltflächen der einzelnen Kristalle sind verbogen. Außerdem zeigen sie eine undulöse Auslöschung. Es handelt sich hierbei vermutlich um eine Scherzone innerhalb des Marmors.

Die XRD-Messung zeigt, dass außer Calcit noch Dolomit und auch Quarz vorhanden sind. Der Dolomit-Anteil kann allerdings durch die RFA-Messung nicht bestätigt werden. Der Anteil von MgO mit 0,24 % ist nicht wesentlich höher als im Marmor von Bohrkern I. Doch der SiO<sub>2</sub>-Anteil ist mit 7,6 % relativ hoch. Die Ergebnisse der restlichen Oxide sind so gering, dass sie vernachlässigt werden können. Auch bei den Spurenelementen zeigen sich keine Auffälligkeiten.

### 5.1.2.2 BK II – Kalkmörtel

Der Kalkmörtel besitzt eine weiß-graue bis leicht gelbliche Färbung. Der Zuschlag wird hauptsächlich aus gerundeten Quarzkörnern gebildet. Daneben treten vereinzelt auch Feldspäte auf. Die Korngröße des Zuschlages liegt im Bereich von Mittelsand. Das Bindemittel besteht hauptsächlich aus Kalk, welcher jedoch nicht vollständig durchkarbonatisiert ist (s. Tafel 5a, Abb. 4-6). Der Kalk besitzt nur einen geringen hydraulischen Anteil. Im Dünnschliff konnten keine Belitnester gefunden werden. Mittels REM-Untersuchungen sind einige Klinkerreste nachgewiesen worden. Außerdem ist unter dem Rasterelektronenmikroskop eine sekundäre Ettringitbildung im Bindemittel zu beobachten. Mit der Röntgenaufnahme konnten hauptsächlich Quarz, Calcit und Portlandit nachgewiesen werden. Die ersten beiden deutlichen Peaks wurden Ettringit und Gips zugeordnet. Als Feldspatvertreter wurden diesem Diagramm Albit und Anorthit zugeordnet.

### 5.1.2.3 BK II- Ziegel

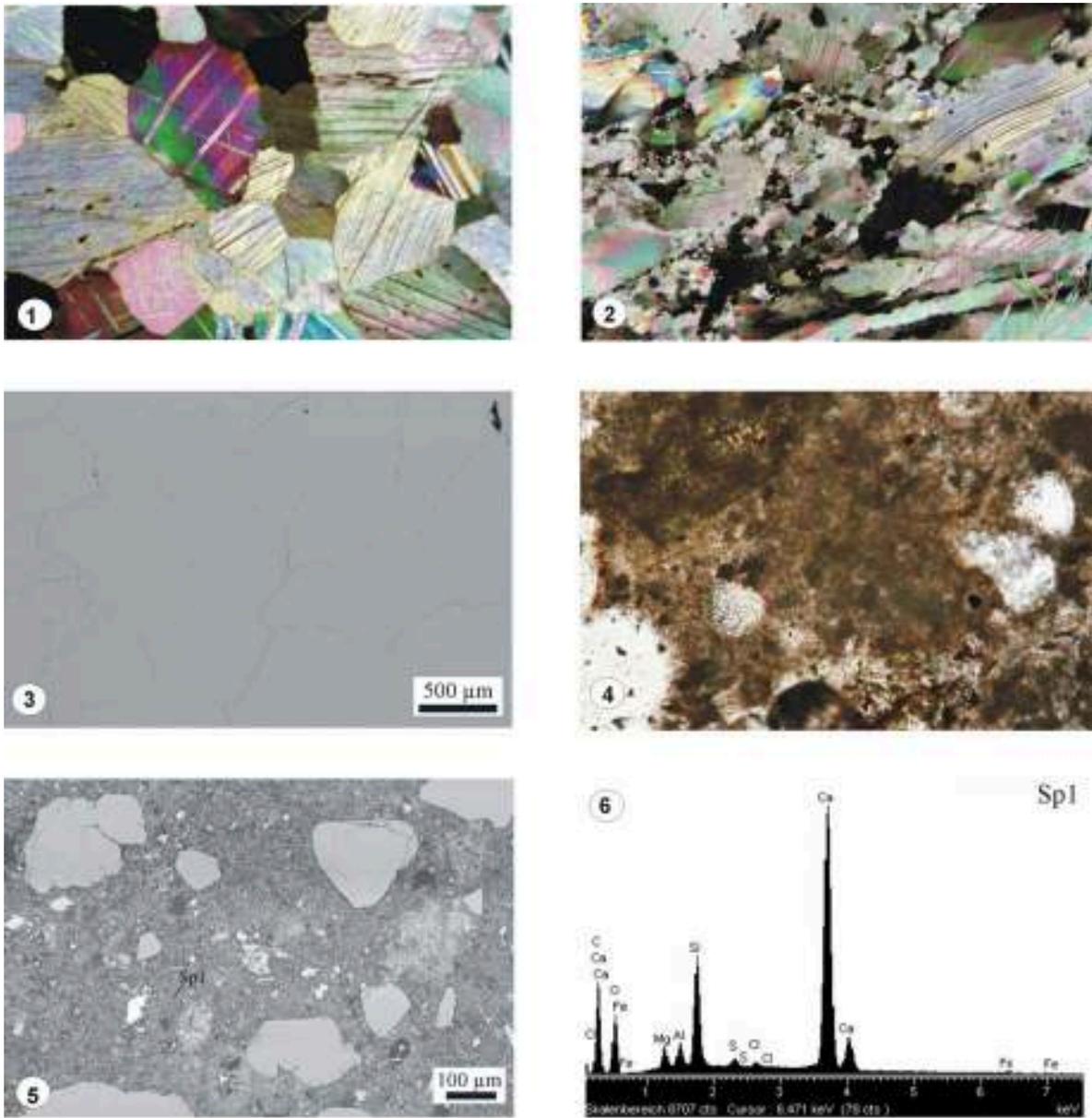
Die Farbe dieses Ziegels ist gelblich. In dem Ziegel befinden sich zumeist eckig ausgebildete Quarzkörner. Die Korngröße liegt hauptsächlich im Bereich von Silt und Feinsand. Teilweise gibt es jedoch auch Aggregate mit einer Korngröße von Grobsand. Die Matrix aus Diopsid, Albit und Anorthit ist sehr feinkörnig und bildet teilweise einen Saum um die Quarzkörner (s. Tafel Abb. 1).

### 5.1.2.4 BK II - Zementmörtel

Der Zementmörtel aus Bohrkern II besitzt eine graue Farbe. Er ist mit dem Zementmörtel aus Bohrkern I vergleichbar. Der Zuschlag besteht hauptsächlich aus gerundeten bis schwach polygonalen Quarzkörnern. Daneben treten auch Feldspäte und vereinzelt Calcitkörner auf. Die Korngröße liegt im Fein- bis Mittelsand-Bereich. Das Bindemittel ist ein hydraulisches Bindemittel mit CSH-Phasen und Klinkerresten (s. Tafel 5b Abb. 2 und Abb. 4). Im Rasterelektronenbild ist im Bindemittel ein Netz aus feinen Mikrorissen erkennbar. Der Verbund von Zuschlag und Bindemittel ist gut. In den Poren ist eine

sekundäre Ettringitbildung zu beobachten (s. Tafel 5b, Abb. 3).

Der einzige Unterschied zu dem Zementmörtel aus Bohrkern I in der Elementmessung mit der RFA besteht in dem etwas geringeren  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ -Gehalt, obwohl hier im Dünnschliff Hämatit gefunden wurde. Im Röntgendiagramm konnte Hämatit allerdings nicht nachgewiesen werden.

**Tafel 5a: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern II**

**Abb. 1:** Polygonales Kristallgefüge im Marmor aus Bohrkern II; Durchlicht + Pol., Bildbreite 5,33 mm.

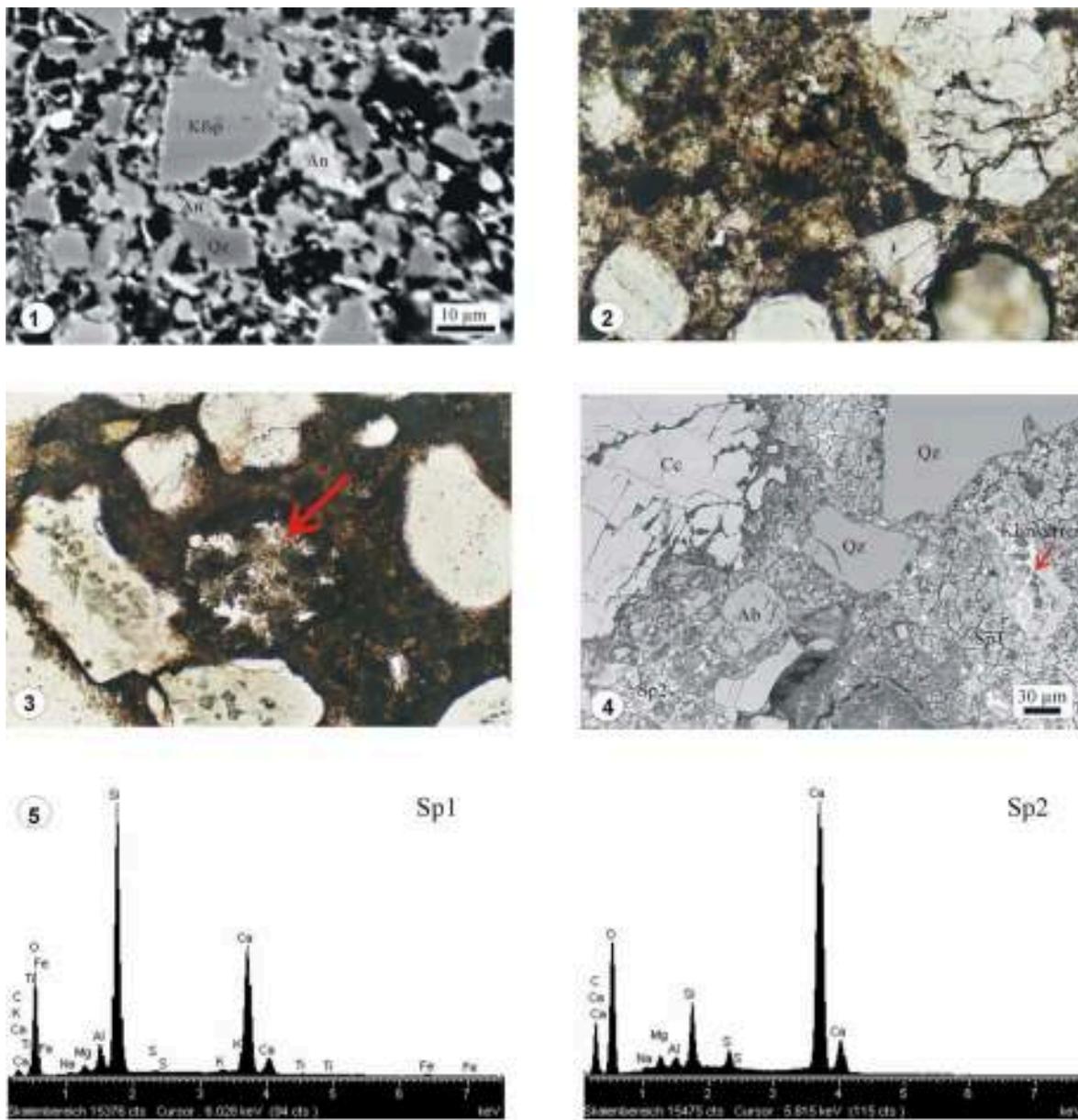
**Abb. 2:** Kornverkleinerung im Marmor aus Bohrkern II; Durchlicht + Pol., Bildbreite 5,33 mm.

**Abb. 3:** Mikrorisse im Marmor aus Bohrkern II; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild)

**Abb. 4:** Hydraulisches Bindemittel mit einem nebulösen Erscheinungsbild der CSH-Phasen im Kalkmörtel aus Bohrkern II; Durchlicht, Bildbreite 0,66 mm.

**Abb. 5:** Kalkmörtel aus Bohrkern II; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 6:** EDX-Spektrum 1 des Bindemittels im Kalkmörtel aus Abb. 5 (Sp1).

**Tafel 5b: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern II**

**Abb. 1:** Ziegel aus Bohrkern II mit unterschiedlichen Zuschlagstoffen (Qz = Quarz; An = Anorthit; Kfs = Kalifeldspat); REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 2:** Hydraulisches Bindemittel mit CSH-Phasen des Zementmörtels aus Bohrkern II; Durchlicht, Bildbreite 0,79 mm.

**Abb. 3:** Sekundäre Ettringitbildung in einer Pore im Zementmörtel aus Bohrkern II; Durchlicht, Bildbreite 1,52 mm.

**Abb. 4:** Zementmörtel aus Bohrkern II (Qz = Quarz; Cc = Calcit; Ab = Albit); REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 5:** EDX-Spektrum 1 des Bindemittels im Zementmörtel aus Abb. 4 (Sp1).

**Abb. 6:** EDX-Spektrum 2 des Bindemittels im Zementmörtel aus Abb. 4 (Sp2).

### 5.1.3 Rückwand: Bohrkern III (BK III)

Der Bohrkern III stammt aus der Rückwand hinter der zweiten Säule von links. Dieser Teil der Rückwand wurde während der Aufbauphase in den Jahren 1925-1929 errichtet. Der Aufbau dieses Bohrkerns lässt vermuten, dass eine Ziegelmauer errichtet worden ist. Auf diesen Ziegel wurde ein Kalkmörtel aufgetragen und zum Schluss wurde eine Deckschicht, welche als Marmorimitat dienen soll, aufgezputzt und mit einem unregelmäßigen Muster versehen. Die Tafel 6 zeigt Dünnschliff- und REM-Aufnahmen der Materialien aus Bohrkern III.

#### 5.1.3.1 BK III - Deckschicht

Die Deckschicht des Bohrkerns III repräsentiert einen weißen Kalkmörtel. Der Zuschlag besteht hauptsächlich aus Dolomit. Die Körner sind zumeist eckig, wobei sich die Korngröße im Bereich von Feinsand befindet. Die EDX-Spektren des REM zeigen, dass das Bindemittel fast ausschließlich aus Calciumsilikaten besteht. Mit den REM-Aufnahmen konnten einige Klinkerreste nachgewiesen werden (s. Tafel 6, Abb. 2). Der Verbund zwischen Zuschlag und Bindemittel ist sehr gut.

Das XRD-Diagramm zeigt, dass die Deckschicht hauptsächlich aus Dolomit, Calcit und Quarz besteht. Einige kleinere Peaks konnten Belit (=engl. Larnite) zugeordnet werden. Eine RFA-Messung konnte aufgrund des geringen Probenmaterials nicht vorgenommen werden. Das Röntgendiagramm ist denen der Deckschichten von BK IV und BK V jedoch sehr ähnlich. Da diese beiden Ergänzungsmörtel auch fast identische RFA-Daten aufweisen, kann mit großer Sicherheit vermutet werden, dass dieser Mörtel ähnliche Werte hat (siehe BK IV - und BK V – Deckschichten).

### 5.1.3.2 BK III - Kalkmörtel

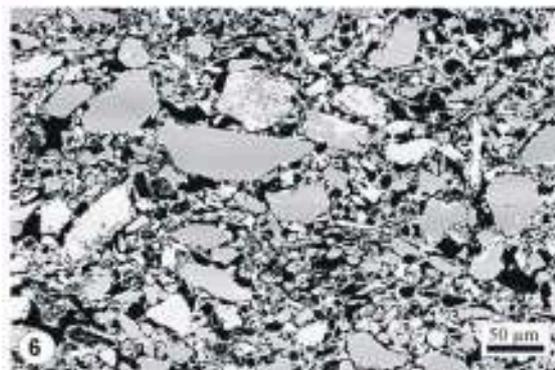
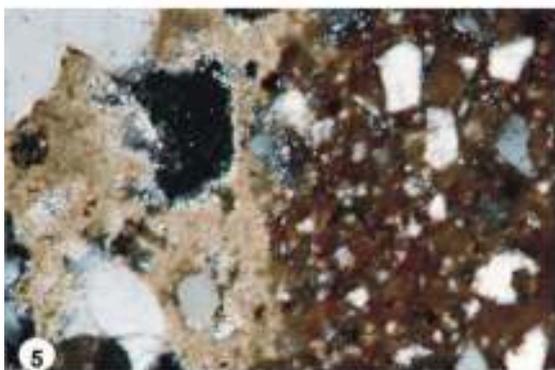
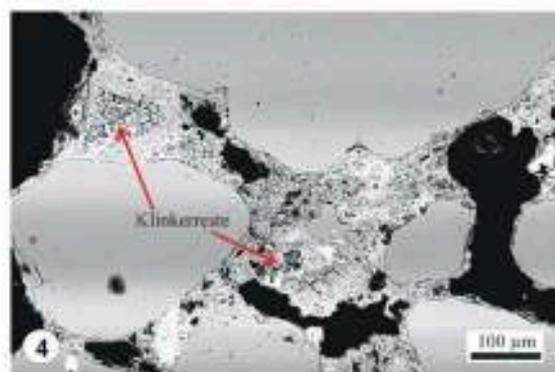
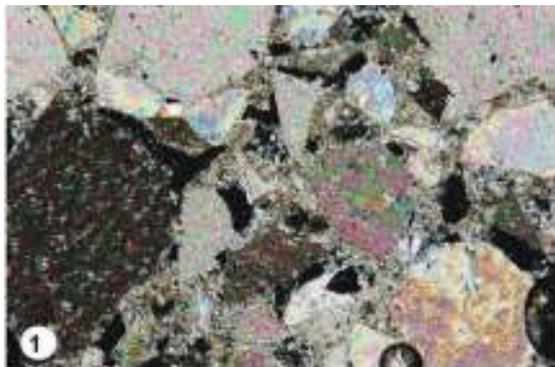
Der Kalkmörtel aus Bohrkern III besitzt eine graue Farbe. Der Zuschlag besteht aus gerundeten Quarzkörnern. Untergeordnet können auch Feldspäte beteiligt sein. Die Korngröße der Zuschlagstoffe liegt im mittleren Sandbereich. Der hydraulische Anteil im Bindemittel ist gering, es sind nur vereinzelt CSH-Phasen zu erkennen. Das Verhältnis Zuschlag zu Bindemittel ist in diesem Mörtel relativ groß. Dies geht sowohl aus dem Dünnschliff sowie auch aus den REM-Bildern hervor.

Die RFA-Analyse zeigt für diesen Mörtel als Hauptbestandteile  $\text{SiO}_2$  (75,6 %) und  $\text{CaO}$  (10,36 %). Daneben hat  $\text{Al}_2\text{O}_3$  mit 2,1 % den drittgrößten Anteil. Auch das Röntgendiagramm von BK III B zeigt als Bestandteile ausschließlich Quarz, Calcit und daneben Albit und Anorthit als Feldspatvertreter.

### 5.1.3.3 BK III -Ziegel

Dieser Ziegel ist dem Ziegel aus Bohrkern I ähnlich. Die Farbe des Ziegels ist rötlich. Darin sind eckige bis leicht abgerundete Quarzkörner miteinander verbacken. Die Quarzkörner liegen in der Größenordnung von Silt bis Feinsand (s. Tafel 6, Abb. 6).

Die RFA-Analyse zeigt ein paar Unterschiede zu den restlichen untersuchten Ziegeln: Der  $\text{CaO}$ -Gehalt ist hier mit 8,44% geringer als bei den anderen Ziegeln in BK I, BK II und BK IV (~11%). Der  $\text{P}_2\text{O}_5$ -Gehalt ist dagegen mit 1,24% etwas höher. In den anderen Ziegeln wurde ein Gehalt von ca. 0,12% gemessen.

**Tafel 6: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern III**

**Abb. 1:** Zuschlagstofffreie Deckschicht aus Bohrkern III; Durchlicht + Pol., Bildbreite 0,66 mm.

**Abb. 2:** Klinkerreste in der Deckschicht aus Bohrkern III; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 3:** Bindemittelaufnahme des Kalkmörtels aus Bohrkern III; Durchlicht + Pol., Bildbreite 0,21 mm.

**Abb. 4:** Kalkmörtel aus Bohrkern III mit Klinkerresten im Bindemittel; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 5:** Übergang vom Kalkmörtel zum Ziegel aus Bohrkern III; Durchlicht + Pol., Bildbreite 0,66 mm.

**Abb. 6:** Übersichtsbild des Ziegels aus Bohrkern III; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

### 5.1.4 Sockel: Bohrkern IV (BK IV)

Dieser Bohrkern wurde aus dem Sockel der ersten Säule von links entnommen. Dieses Sockelteil wurde nachgebaut und stammt aus der ersten Aufbauphase von 1925-29, musste aber nach dem Bombentreffer 1952-54 abermals restauriert werden. An dieser Entnahmestelle handelt es sich vermutlich um die „Original Ergänzung“ von dem Aufbau in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts, da sich die Deckschichten von Bohrkern III, IV und V sehr ähnlich sind. Am Ende dieses Bohrkern wurde noch ein Stück Marmor mit herausgebohrt (Marmorstück fehlt auf Abb. 1 in Tafel 2). Dabei handelt es sich um ein Anschnittphänomen. In Abb. 2 der Tafel 2 ist das entsprechende Bohrloch abgebildet. Darin ist zu sehen, dass in diesem Sockelfuß noch originale Marmorteile enthalten sind. Diese wurden am Ende des Bohrkerns mit entnommen. Die Tafeln 7a und 7b zeigen Dünnschliff- und REM-Aufnahmen der Materialien aus Bohrkern IV.

#### 5.1.4.1 BK IV – Deckschicht

Die Farbe der Deckschicht aus Bohrkern IV ist weiß. Der Zuschlag wird von Dolomit gebildet und besitzt eine Korngröße von Feinsand. Das Bindemittel besteht aus Calciumsilikaten. Vereinzelt tritt Gips im Bindemittelgefüge auf. Der Verbund zwischen Zuschlag und Bindemittel ist sehr gut. Der Porenraum dieser Probe ist sehr groß, wie im Dünnschliff zu beobachten ist (s. Tafel 7a, Abb. 2). Der tatsächlich gemessene Porenraum wird in Kap. 7.1 dargestellt.

Die Röntgenaufnahme zeigt außer den Hauptkomponenten Dolomit und Calcit, einen deutlichen Gipspeak bei 11-12  $2\theta$ . Auch Quarz ist in geringer Menge vorhanden. Nach der RFA-Analyse beträgt der  $\text{SiO}_2$ -Gehalt der Probe 4,7 %.

#### 5.1.4.2 BK IV – Kalkmörtel 1

Der Kalkmörtel aus Bohrkern IV besitzt eine graue Farbe. Der Zuschlag wird hauptsächlich aus gerundeten Quarzkörnern in der Korngröße Mittelsand gebildet. Das Bindemittel ist nur schwach hydraulisch. Im REM sind einige Klinkerreste zu sehen (s. Tafel 7a, Abb. 4).

Das Röntgendiagramm zeigt neben Quarz, Calcit, Albit und Mikroklin einen geringen Anteil an Portlandit.

#### 5.1.4.3 BK IV – Ziegel

Dieses Ziegelstück ist zwischen den Kalkmörteln 1 und 2 eingebettet. Die Farbe des Ziegels ist rot. Der Zuschlag besteht aus leicht abgerundeten Quarzkörnern mit einer Korngröße von Silt bis Feinsand. Auch bei diesem Ziegel konnte im REM festgestellt werden, dass die Matrix einen Saum um die Quarzkörner bildet (s. Tafel 7a, Abb. 5). Diese Matrix besteht aus Diopsid, Anorthit und Albit (siehe auch Ziegel aus Bohrkern I).

Für diesen Ziegel wurde aufgrund des geringen Probenmaterials auf eine mineralogische Untersuchung verzichtet. Aufgrund der Rasterelektronenbilder konnte festgestellt werden, dass dieses Ziegelstück den anderen Ziegeln aus den Bohrkernen I, II, III und V sehr ähnlich ist. Da die letztgenannten Ziegel alle ähnliche RFA-Analysen und auch ähnliche XRD-Diagramme ergeben haben, kann davon ausgegangen werden, dass auch dieser Ziegel ähnliche Werte aufweist.

#### 5.1.4.4 BK IV - Kalkmörtel 2

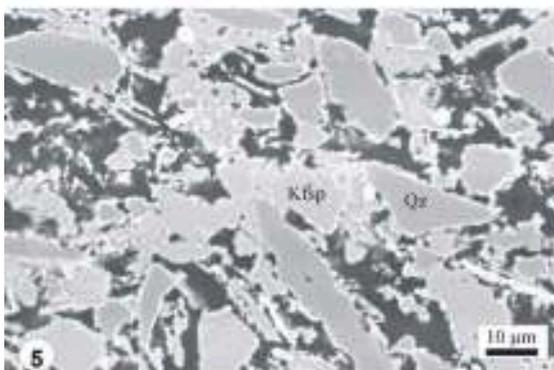
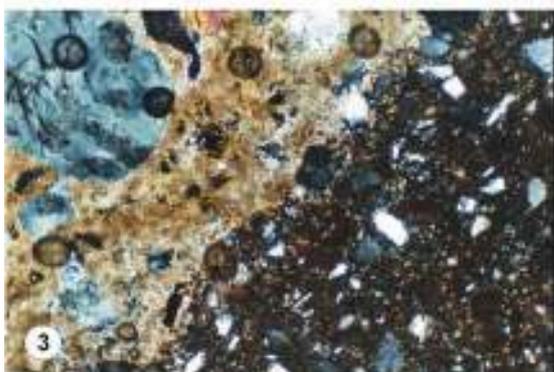
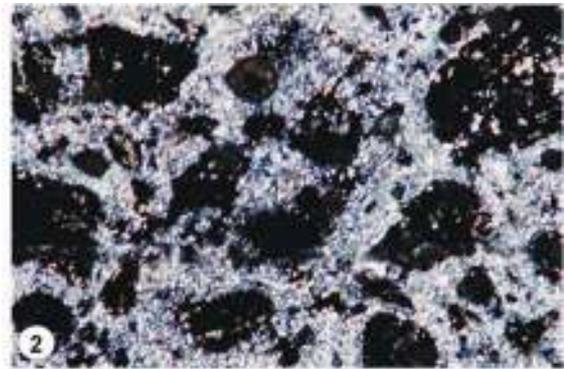
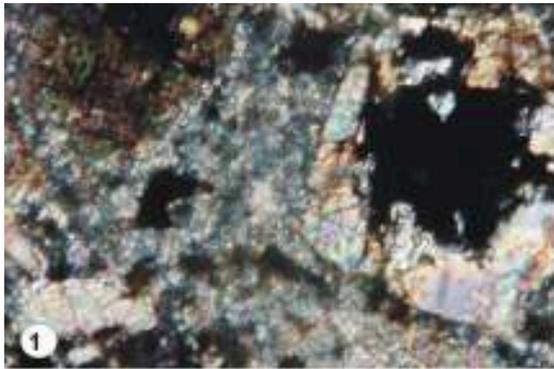
Die Farbe des Kalkmörtel 2 ist im Gegensatz zu dem Kalkmörtel 1 dieses Bohrkerns weißgrau. Ein weiterer Unterschied ist die größere Porosität (siehe Kapitel 7.1). Vom Gefüge sind sich beide Kalkmörtel relativ ähnlich. Auch bei diesem Probenstück wird der Zuschlag hauptsächlich durch Quarzkörner gebildet. Die Körner sind gerundet und liegen im Korngrößenbereich von Mittelsand. Untergeordnet treten Körner mit einer Korngröße von Grobsand auf. Im Bindemittel wurden einige CSH-Phasen nachgewiesen (s. Tafel 7b, Abb. 1). Der hydraulische Anteil im Bindemittel ist gering. Im Dünnschliff ist zu

beobachten, dass das Verhältnis Zuschlag zu Bindemittel im Kalkmörtel 2 etwas größer ist als im Kalkmörtel 1. Dies kann durch den größeren  $\text{SiO}_2$ -Gehalt (73,6 %) und den geringeren CaO-Gehalt (11,36 %) im Vergleich zu Kalkmörtel 1 ( $\text{SiO}_2$ : 63,2 %; CaO: 17,35 %) der RFA-Analyse bestätigt werden. Die Röntgendiagramme beider Mörtel sind sich insoweit ähnlich, bis auf dass bei diesem Kalkmörtel kein Portlandit nachgewiesen wurde.

#### 5.1.4.5 BK IV – Marmor

Von diesem Probenstück konnte lediglich ein Dünnschliff angefertigt werden. Für weitere Untersuchungen war nicht genügend Probenmaterial vorhanden.

Die Farbe dieses Marmores ist weiß. Vom Gefüge ist er dem Marmor aus Bohrkern II, innerer Teil, sehr ähnlich. Die Korngröße der einzelnen Calcitkörner liegt im Grob- bis Mittelsandbereich. Das Korngefüge ist relativ gleichkörnig. Die Körner besitzen eine polygonale Ausbildung und haben equilibrierte Korngrenzen. Zwischen den einzelnen Körnern ist mit dem Rasterelektronenmikroskop eine deutliche Kornentfestigung durch Mikrorissbildung festzustellen.

**Tafel 7a: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern IV**

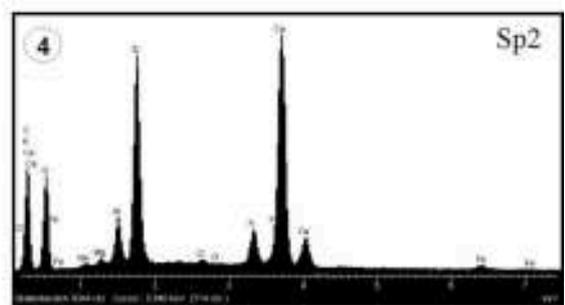
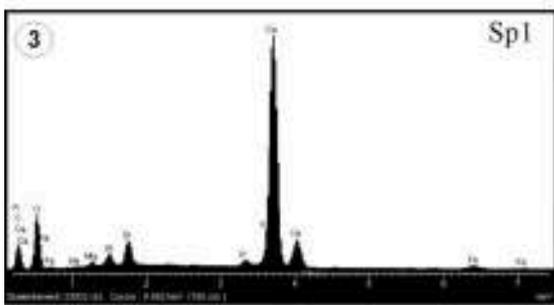
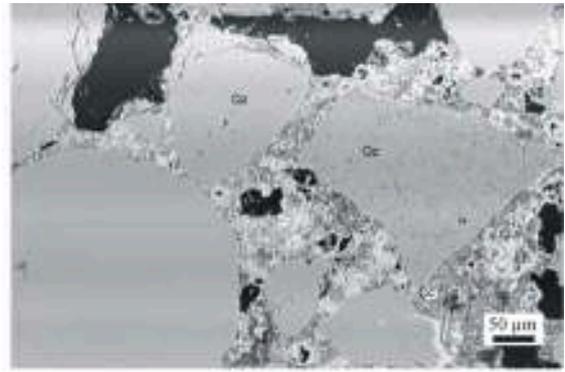
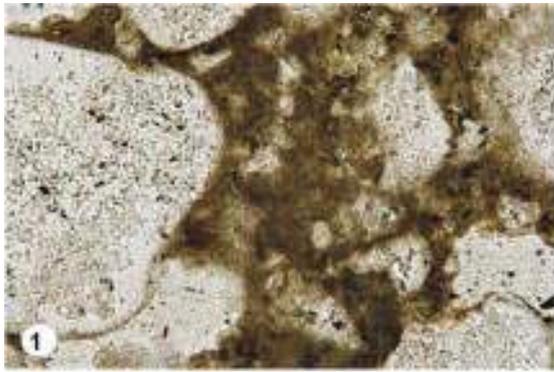
**Abb. 1:** Deckschicht aus Bohrkern IV; Durchlicht + Pol., Bildbreite 0,66 mm.

**Abb. 2:** Großer Porenraum der Deckschicht aus Bohrkern IV; Durchlicht + Pol., Bildbreite 1,34 mm.

**Abb. 3:** Übergang vom Kalkmörtel 1 zum Ziegel aus Bohrkern IV; Durchlicht + Pol., Bildbreite 1,52 mm.

**Abb. 4:** Klinkerrest im Bindemittel des Kalkmörtels 1 aus Bohrkern IV; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 5:** Ziegel aus Bohrkern IV mit Saum um Zuschlagkörner (Qz = Quarz; Kfsp = Kalifeldspat); REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Tafel 7b: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern IV**

**Abb. 1:** Gering hydraulisches Bindemittel mit CSH-Phasen im Kalkmörtel 2 aus Bohrkern IV; Durchlicht, Bildbreite 0,66 mm.

**Abb. 2:** Kalkmörtel 2 aus Bohrkern IV; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 3:** EDX-Spektrum 1 des Bindemittels (heller Teil) aus Abb. 2 (Sp1).

**Abb. 4:** EDX-Spektrum 2 des Bindemittels (dunkler Teil) aus Abb. 2 (Sp2).

**Abb. 5:** Polygonales Korngefüge im Marmor aus Bohrkern IV; Durchlicht + Pol., Bildbreite 5,33 mm.

**Abb. 6:** Mikrorisse im Marmor aus Bohrkern IV; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

### 5.1.5 Restaurierte Säule: Bohrkern V (BK V)

Dieser Bohrkern stammt aus der zweiten Säule von links. Diese Säule wurde in der Aufbauphase von 1925-29 rekonstruiert. Der Bohrkern wird als erstes von einer Deckschicht aufgebaut, die als Marmorimitat dient. Darauf folgt ein Zementmörtel, welcher wiederum von einem Kalkmörtel abgelöst wird. Als letzter Bestandteil dieses Bohrkernes folgt ein Ziegel. Einige Abbildungen sind den Tafeln 8a und 8b zu entnehmen.

#### 5.1.5.1 BK V – Deckschicht

Die Farbe der Deckschicht aus Bohrkern V ist weiß. Der Mörtel besteht fast ausschließlich aus Dolomit und Calcit. Wie EDX-Spektren beim REM zeigen, besteht der Zuschlag aus Dolomit und das Bindemittel hauptsächlich aus Calcit (s. Tafel 8a, Abb. 1-4). Daneben gibt es im Bindemittel auch einige Calciumsilikate (erscheinen weiß in den REM-Aufnahmen). Die Dolomitmörner im Zuschlag sind zumeist eckig und besitzen eine Korngröße von Feinsand. Das Bindemittel ist sehr feinkörnig.

#### 5.1.5.2 BK V – Zementmörtel

Der Zementmörtel aus Bohrkern V besitzt eine graue Farbe. Der Zuschlag besteht zum größten Teil aus zumeist gut abgerundeten Quarzkörnern. Die Korngröße liegt im Bereich von Fein- bis Mittelsand. Im Bindemittel sind sowohl im Dünnschliff wie auch in REM-Aufnahmen deutlich Belitnester zu beobachten (s. Tafel 8a, Abb. 5-6). Im Dünnschliff ist ein nebliger Überzug von CSH-Phasen zu erkennen. Das Bindemittel und der Zuschlag sind gut miteinander verbunden.

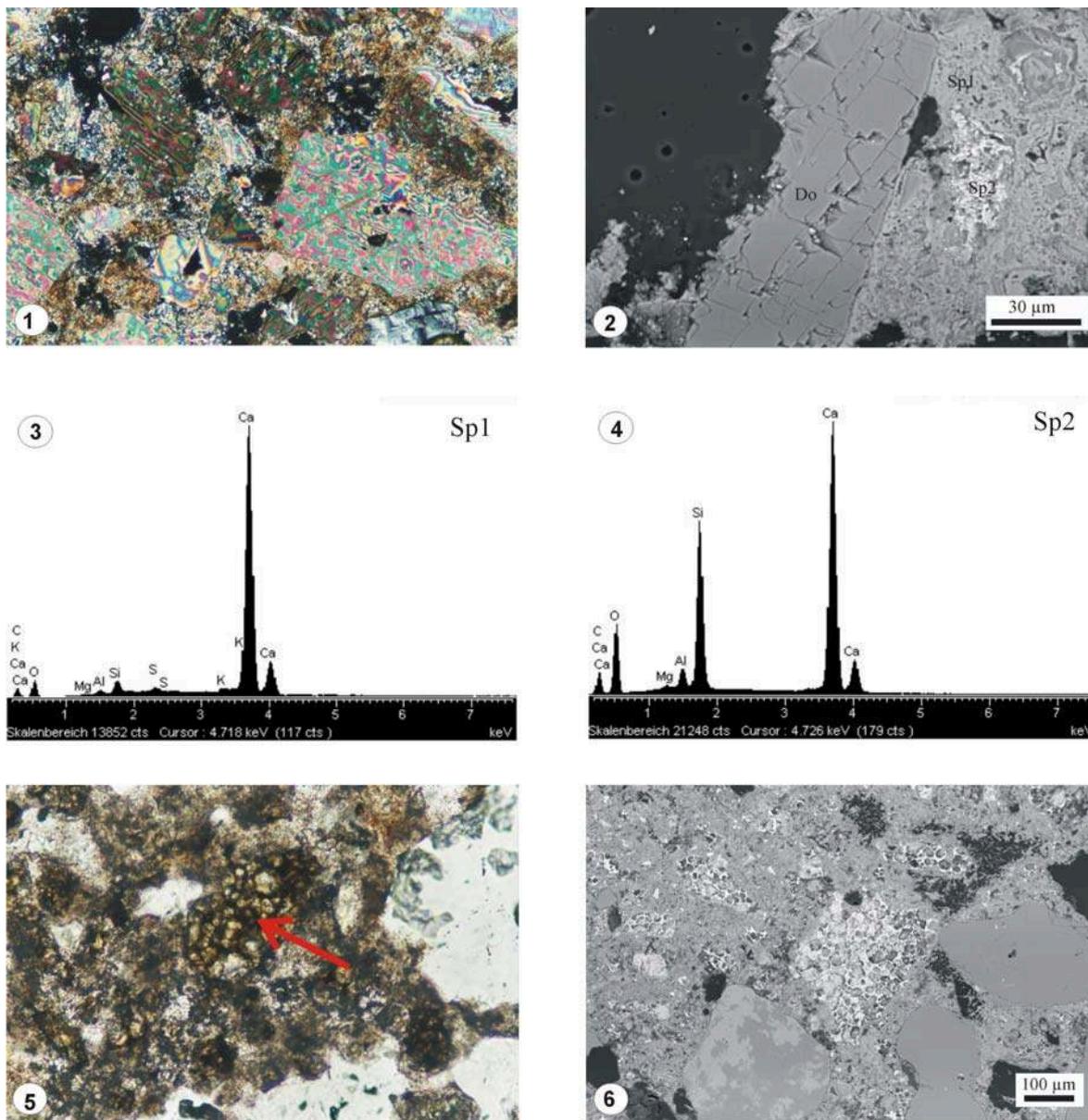
Die RFA-Analyse zeigt als Hauptkomponenten  $\text{SiO}_2$  (61,4%) und  $\text{CaO}$  (21,33 %). Der  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Gehalt beträgt in dieser Probe 2,8 % und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  noch 1,04 %. Alle anderen Oxide liegen deutlich unter 1 %. Die Gehalte der Spurenelemente zeigen keine Auffälligkeiten. Im Röntgendiagramm kann auch hier als Hauptkomponente Quarz festgestellt werden. Daneben wurden noch einige andere Minerale identifiziert. Dazu gehören Calcit, Albit, Portlandit und Calciumsilikathydrate. Die ersten zwei ganz kleinen Peaks wurden den Mineralen Ettringit und Gips zugeordnet.

### 5.1.5.3 BK V – Kalkmörtel

Die Farbe von dem Kalkmörtel aus Bohrkern V ist weißgrau. Der Zuschlag besteht hauptsächlich aus gerundeten bis leicht eckigen Quarzkörnern. Daneben treten vereinzelt Feldspäte auf. Der Zuschlag hat eine Korngröße von Mittelsand. Das Bindemittel ist sehr feinkörnig. Die Hauptelemente im Bindemittel sind Ca und Si, wie mit der EDX unter dem REM festgestellt werden konnte. Im Dünnschliff konnten keine Belitnester oder CSH-Phasen gefunden werden. Mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie wurden allerdings einige Klinkerreste nachgewiesen (s. Tafel 8b, Abb. 2). In der Röntgenaufnahme konnten die Minerale Quarz, Albit, Portlandit Calcit, Ettringit und Gips bestimmt werden.

### 5.1.5.4 BK V – Ziegel

Die Farbe des Ziegels ist leicht gelblich bis orange. In dem Ziegel sind gerundete bis leicht eckige Quarz- und Feldspatkörner zu finden. Auch einige längliche Aggregate wurden beobachtet. Die Korngröße liegt hauptsächlich im Bereich von Silt und Feinsand. Vereinzelt sind aber auch Teile bis zu Kiesgröße zu finden. Die Matrix ist sehr feinkörnig. Auch in diesem Ziegel bildet die Matrix teilweise einen Saum um die Quarzkörner.

**Tafel 8a: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern V**

**Abb. 1:** Zuschlagstoffreiche Deckschicht aus Bohrkern V; Durchlicht + Pol., Bildbreite 0,79 mm.

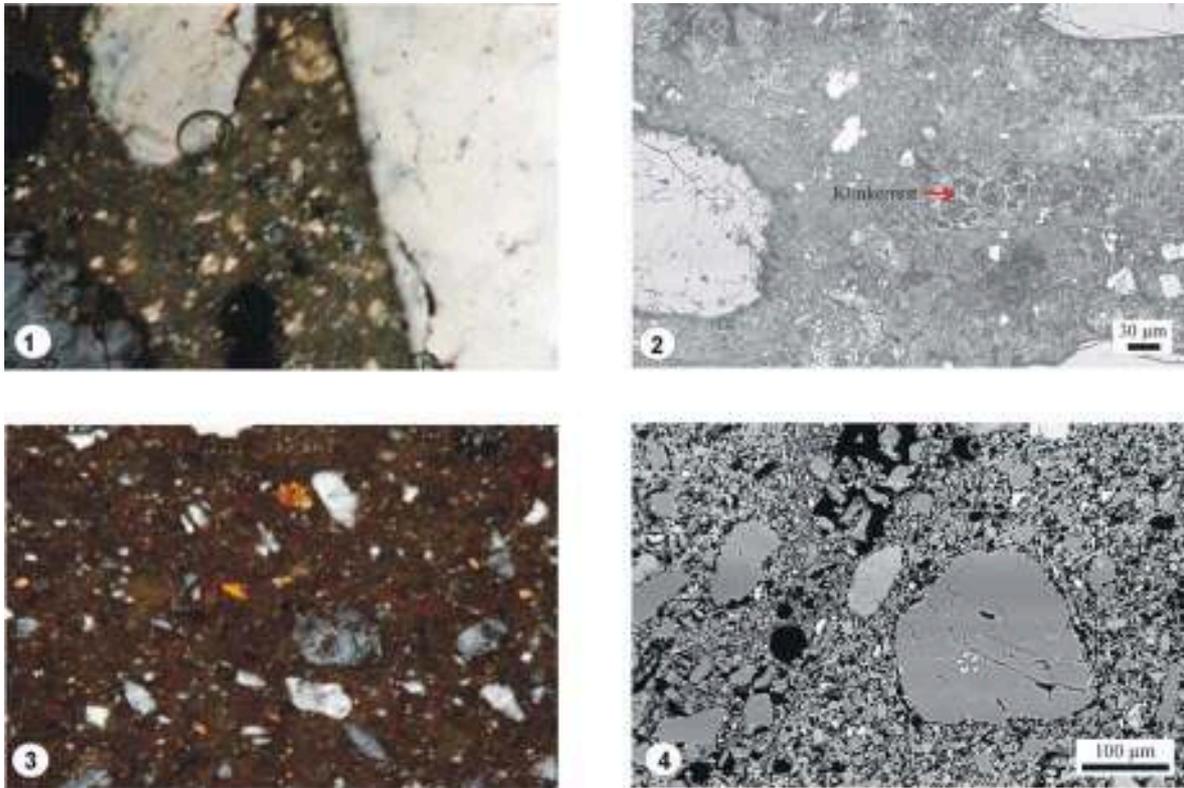
**Abb. 2:** Deckschicht aus Bohrkern V mit dolomitischem Zuschlag (Do = Dolomit); REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 3:** EDX-Spektrum 1 des Bindemittels (grauer Teil) aus Abb. 2 (Sp1).

**Abb. 4:** EDX-Spektrum 2 des Bindemittels (heller Teil) aus Abb. 2 Sp2).

**Abb. 5:** Belitnester im Zementmörtel aus Bohrkern V; Durchlicht, Bildbreite 0,79 mm.

**Abb. 6:** Klinkerreicher Zementmörtel aus Bohrkern V; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Tafel 8b: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern V**

**Abb. 1:** Kalkmörtel aus Bohrkern V; Durchlicht + Pol., Bildbreite 0,66 mm.

**Abb. 2:** Klinkerrest im Bindemittel des Kalkmörtels aus Bohrkern V; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 3:** Übersichtsbild des Ziegels aus Bohrkern V; Durchlicht + Pol., Bildbreite 0,66 mm.

**Abb. 4:** Übersichtsbild des Ziegels aus Bohrkern V; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

## 5.2 Probenmaterial des Aufbaus von 1952-1959

Nach einem Bombentreffer im zweiten Weltkrieg wurde der rechte Flügel des Markttors teilweise zerstört und musste in den 50er Jahren restauriert werden. Die folgenden Bohrkerne stammen aus den wiederaufgebauten Teilen. Dabei wurden jeweils Bohrkerne aus einer restaurierten Säule (BK VI) und aus der Rückwand (BK VII) entnommen.

### 5.2.1 Restaurierte Säule: Bohrkern VI (BK VI)

Der Bohrkern VI stammt aus der dritten Säule von rechts. Diese Säule musste wiederhergestellt werden. Der Aufbau und Materialien dieses Bohrkerns sind vollständig anders als die der schon beschriebenen Bohrkerne. Das Innere der Säule besteht aus Beton. Darauf wurde eine Deckschicht als Marmorimitat aufgetragen. Diese Deckschicht hat eine andere mineralogische Zusammensetzung als die bisher beschriebenen Deckschichten anderer Bohrkerne. Dieser Bohrkern hat zudem die Besonderheit, dass eine Bewehrung mit angebohrt wurde (siehe auch Tafel 2, Abb. 5). In Tafel 9 sind Dünnschliff- und REM-Aufnahmen der Materialien aus Bohrkern VI abgebildet.

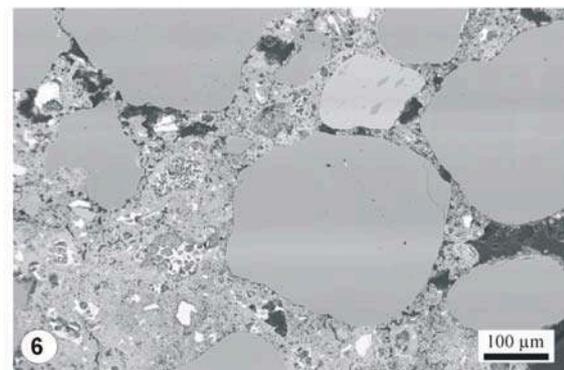
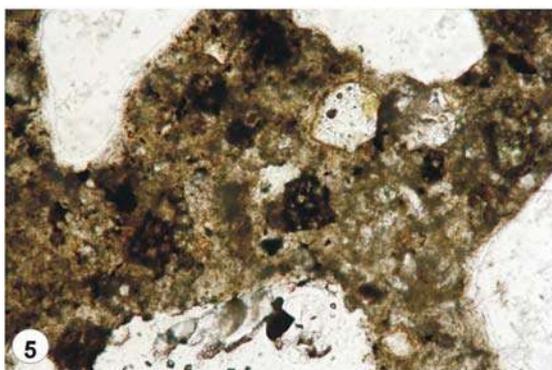
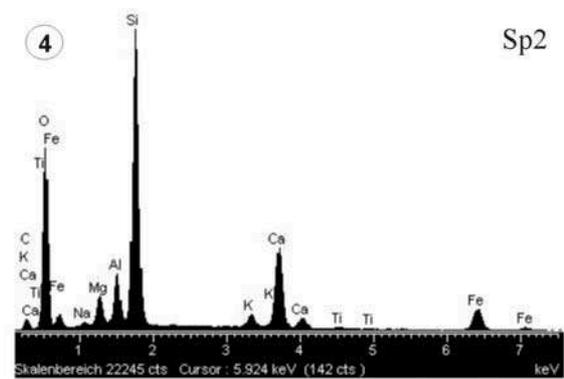
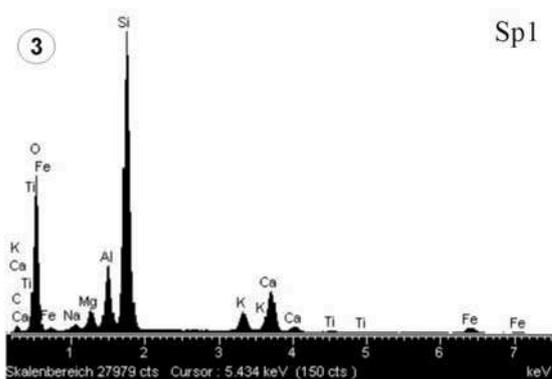
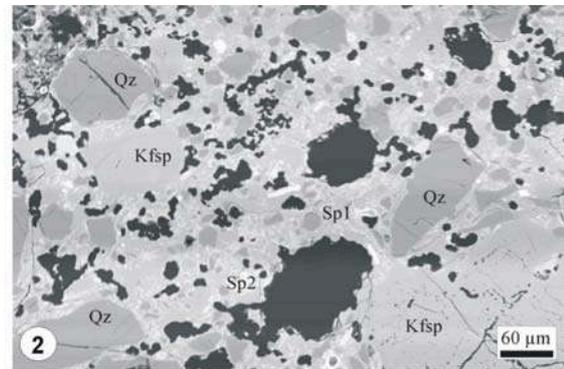
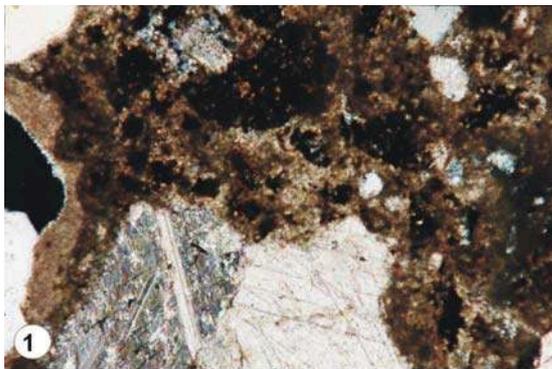
#### 5.2.1.1 BK VI – Deckschicht

Auch diese Deckschicht besitzt eine weiße Farbe, da sie als ein Marmorimitat dienen soll. Doch im Unterschied zu den Deckschichten von den Bohrkernen III – V besteht hier der Zuschlag aus Quarz und Feldspat und nicht aus Dolomit wie in den zuvor beschriebenen Deckschichten. Die Zuschlagkörner sind abgerundet und haben eine Korngröße von Silt bis Feinsand. Das Bindemittel ist sehr feinkörnig. EDX-Aufnahmen des Bindemittel zeigen, dass in diesem hauptsächlich die Elemente Ca, Al und Silizium vorkommen (s. Tafel 9, Abb. 3 und Abb. 4). Daneben gibt es kleine Peaks von Magnesium und Eisen. Es könnte sich hierbei um Calciumsilikate und Aluminatferrit handeln. Die Aufnahme mittels der Röntgendiffraktometrie zeigt als Elemente lediglich Quarz, Albit (als Feldspatvertreter) und Calcit an. Der Verbund von Zuschlag und Bindemittel ist sehr gut.

### 5.2.1.2 BK VI – Beton

Bei der Bohrung wurde in diesem Probenstück ein Stück eines Bewehrungsstahls mit herausgebohrt. Bei diesem Bohrkernteil handelt es sich um einen feinkörnigen Beton. Die Farbe ist grau. In diesem Beton sind Aggregate in Korngröße mit verarbeitet worden. Eines dieser größeren Aggregate wurde im Dünnschliff mit angeschliffen. Dabei handelt es sich um einen Kalkstein, in dem Muschelschalen zu beobachten sind. Zum Inneren der Säule sind mehrere dunkelgraue Aggregate zu sehen. Davon wurden allerdings keine Dünnschliffe angefertigt.

Ansonsten liegt die Korngröße des Zuschlages im Sandbereich. Diese Körner bestehen größtenteils aus Quarz und sind gut gerundet. Im Dünnschliff sind CSH-Phasen und Belitnester (Klinkerrest) zu beobachten. Auch in den REM-Aufnahmen wurden Klinkerreste gefunden. Nach den EDX-Spektren ist im Bindemittel hauptsächlich Si und Ca anzutreffen. Doch auch Al, Fe, Mg, und S sind vorhanden. Mit der Röntgendiffraktometrie wurden hauptsächlich Quarz, Calcit, Albit und Anorthoklas (als Feldspatvertreter) nachgewiesen. Auch ein kleiner Peak Calciumhydroxid (Portlandite) bei ca.  $18\ 2\theta$  wurde gemessen. Von der RFA-Messung ähnelt er den Mörtelproben der anderen Bohrkerne.

**Tafel 9: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern VI**

**Abb. 1:** Belitnester und CSH-Phasen in der Deckschicht aus Bohrkern VI; Durchlicht + Pol., Bildbreite 0,66 mm.

**Abb. 2:** Verschiedene Zuschlagsstoffe in der Deckschicht aus Bohrkern VI (Qz = Quarz; Kfsp = Kalifeldspat); REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 3:** EDX-Spektrum 1 des Bindemittels (hellerer Teil) aus Abb. 2 (Sp1).

**Abb. 4:** EDX-Spektrum 2 des Bindemittels (dunklerer Teil) aus Abb. 2 (Sp2).

**Abb. 5:** Belitnester und CSH-Phasen im Beton aus Bohrkern VI; Durchlicht, Bildbreite 0,66 mm.

**Abb. 6:** Beton aus Bohrkern VI; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

## 5.2.2 Rückwand: Bohrkern VII (BK VII)

Der Bohrkern VII wurde aus der Rückwand hinter der 3. Säule von rechts entnommen. Dieser Teil musste nach dem Bombentreffer in den Jahren 1952-1954 wieder aufgebaut werden. Die Rückwand besteht aus einem Kalkmörtel und Ziegel. Darauf wurde ein weißer Außenputz aufgebracht. Einige Dünnschliff- und REM-Aufnahmen der Geomaterialien aus Bohrkern VII sind der Tafel 10 zu entnehmen.

### 5.2.2.1 BK VII – Außenputz

Der Außenputz der Rückwand besteht aus einem weiß-grauen Kalkmörtel. Der Zuschlag besteht hauptsächlich aus abgerundeten Quarzkörnern und einigen Feldspäten. Die Korngröße liegt im Fein- bis Mittelsandbereich. Das Bindemittelgefüge ist sehr grobkristallin und karbonatisiert (s. Tafel 10, Abb. 2). Der Kalk besitzt einen hydraulischen Charakter.

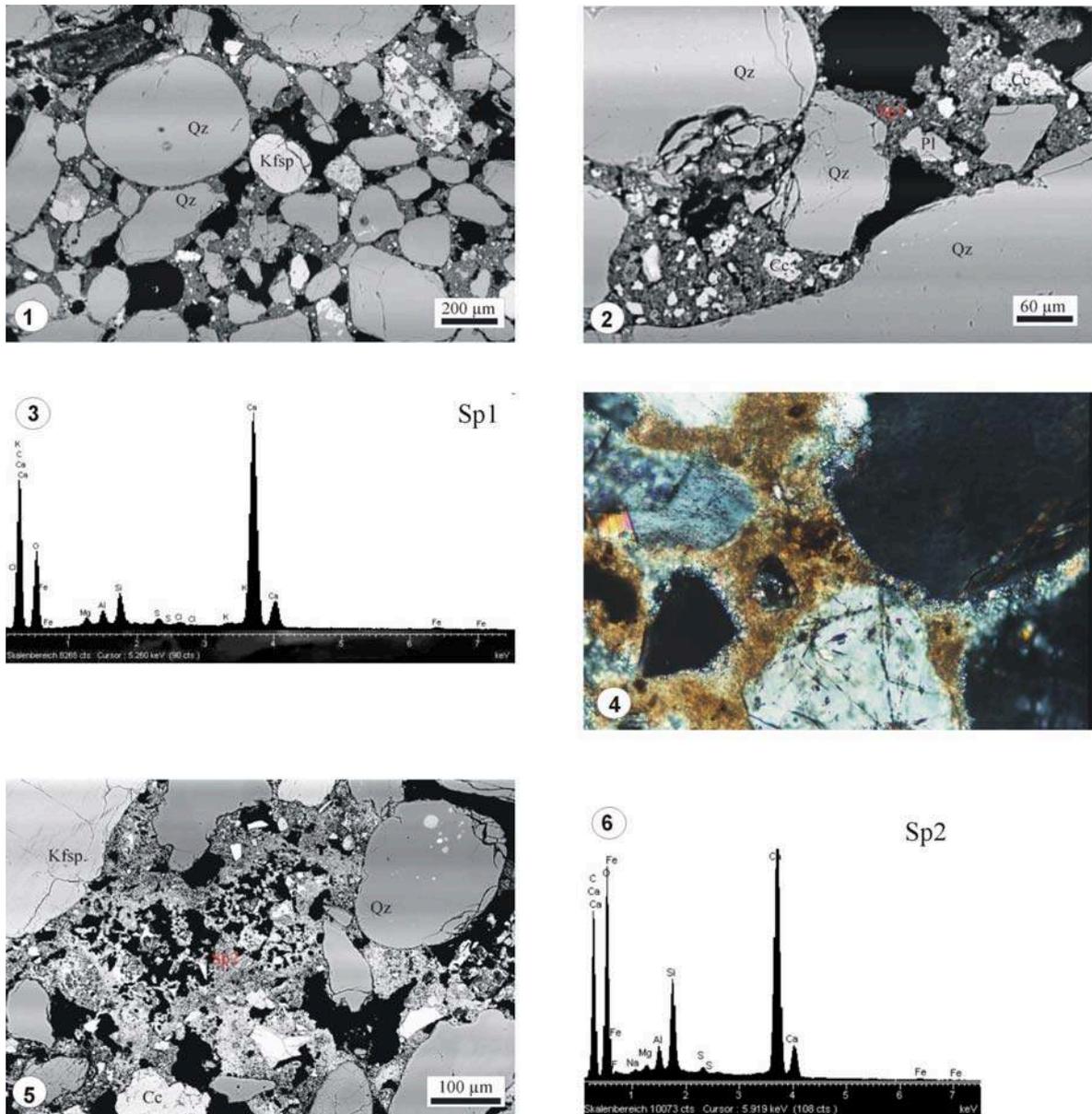
Das Zuschlag zu Bindemittel-Verhältnis ist in dieser Probe höher als in den Kalkmörteln der Aufbauphase der 20er Jahre im 20ten Jahrhundert. Dies zeigt sich auch in der RFA-Analyse: Der Anteil von  $\text{SiO}_2$  ist mit 83 % größer als in den vorher beschriebenen Mörteln; Der CaO-Gehalt ist mit 7 % deutlich geringer.

Mit der Röntgenaufnahme wurden als Hauptkomponenten Quarz und Calcit nachgewiesen. Daneben wurden zwei Peaks in der Röntgenaufnahme den Feldspäten Mikroklin und Albit zugeordnet.

### 5.2.2.2 BK VII - Rückwand

Der Kalkmörtel aus dem Bohrkern in der Rückwand ist mit dem Außenputz vergleichbar. Auch hier besteht der Zuschlag aus leicht abgerundeten Quarzkörnern von Fein- bis Mittelsand. Das Bindemittel ist grobkristallin. Der Kalk im Bindemittel besitzt einen deutlich hydraulischen bis hochhydraulischen Charakter.

Die RDA-Aufnahmen vom Außenputz und der Rückwand ähneln sich sehr stark (s. Kap. 6 Abb. 6.3). Auch die RFA-Analyse zeigt ähnliche Werte wie bei dem Außenputz (s. Tabelle 5.1).

**Tafel 10: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Bohrkern VII**

**Abb. 1:** Übersicht des Kalkmörtels im Außenputz nahe Bohrkern VII (Qz = Quarz; Kfsp = Kalifeldspat); REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 2:** Kalkmörtel im Außenputz nahe Bohrkern VII; (Qz = Quarz; Cc = Calcit; Pl = Plagioklas) REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 3:** EDX-Spektrum 1 des Bindemittels aus Abb. 2 (Sp1).

**Abb. 4:** Kalkmörtel der Rückwand aus Bohrkern VII; Durchlicht + Pol., Bildbreite 0,79 mm.

**Abb. 5:** Kalkmörtel der Rückwand aus Bohrkern VII (Qz = Quarz; Kfsp = Kalifeldspat); REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild),

**Abb. 6:** EDX-Spektrum 2 des Bindemittels aus Abb. 5 (Sp2).

### 5.3 Pergamonaltarprobe (PA)

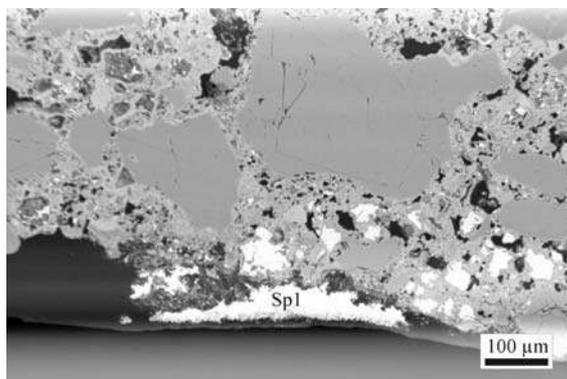
Vom Pergamonaltar wurde ein Probenstück aus dem Keller des Museums untersucht. Dieses Probenstück besteht aus einer weißen Deckschicht und Mörtel, in den größere Ziegelstücke eingearbeitete wurden. Die Tafel 11 zeigt Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus der Pergamonaltarprobe.

#### 5.3.1 PA – Deckschicht

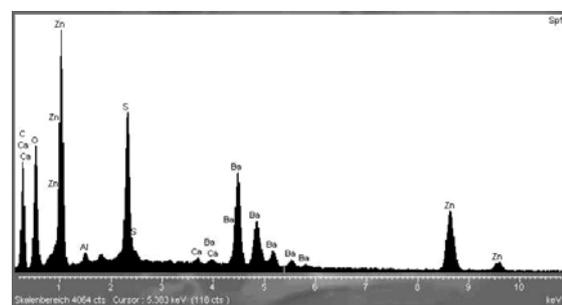
Die Deckschicht besteht aus einem weißen Mörtel. Sie ist mit den Deckschichten vom Markttor von Milet aus den 20er Jahren vergleichbar. Der Zuschlag besteht hauptsächlich aus Dolomit. Die Körner besitzen ein Korngröße von Feinsand und haben eine eckige Kornform. Das Bindemittel besteht hauptsächlich aus Calciumsilikaten. Daneben gibt es im Bindemittel einige Klinkerreste. Der Verbund zwischen Zuschlag und Bindemittel ist sehr gut.

Die RDA-Aufnahme zeigt als Hauptkomponenten Dolomit, Calcit und Quarz.

Anders als bei den Deckschichten des Markttors von Milet wurde auf die Deckschicht des Pergamonaltars eine Farbschicht aufgetragen (s. Abb. 5.10). Diese Farbschicht hat als Hauptkomponenten Barium, Zink und Schwefel (s Abb. 5.11).



**Abb. 5.10:** REM-Aufnahme der Deckschicht des Pergamonaltars (Rückstreuungselektronenbild).



**Abb. 5.11:**EDX-Spektrum 1 (Sp1) der Farbschicht aus Abb. 5.10.

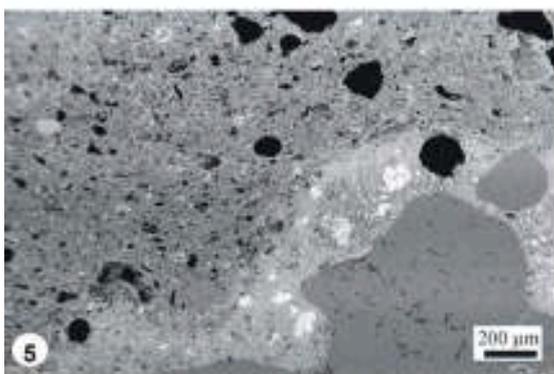
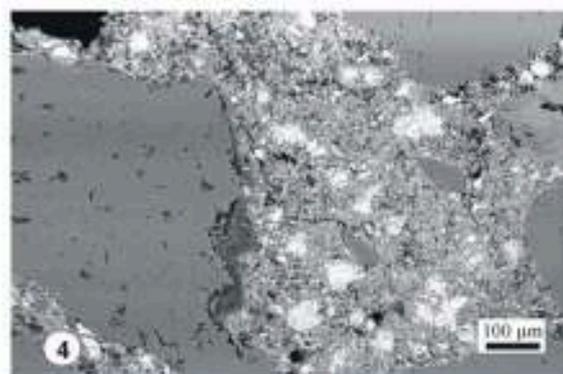
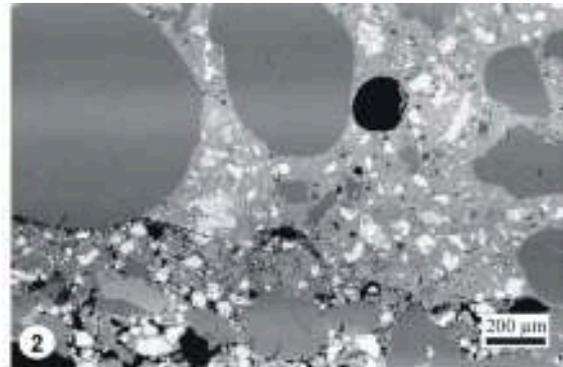
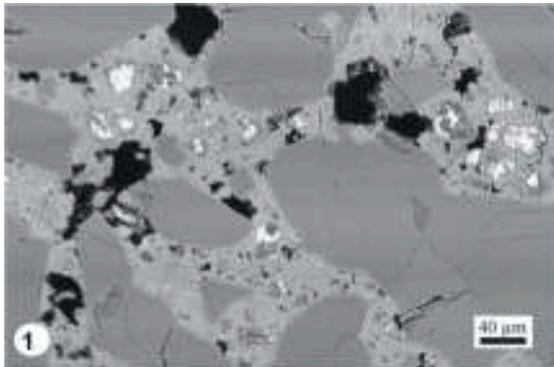
### **5.3.2 PA – Zementmörtel**

Der Zementmörtel aus dem Pergamonaltar besitzt eine graue Farbe. Auch dieser Mörtel ist mit den Zementmörtel des Markttors aus den Aufbau in den 20er Jahren vergleichbar. Der Zuschlag besteht aus leicht abgerundeten Quarzkörnern der Korngrößen Fein- bis Mittelsand. Im Rasterelektronenbild sind im Bindemittel feine Mikrorisse erkennbar. Das Bindemittel besitzt hydraulische Eigenschaften. Es konnten CSH-Phasen und Klinkerreste nachgewiesen werden. Der Verbund zwischen Zuschlag und Bindemittel ist gut.

### **5.3.3 Pa – Ziegel**

In diesem Probenstück sind verschiedene Ziegel zu finden. Die Farben der verschiedenen Ziegelstücke variieren von gelb zu orange-rot. Eckige Quarz und Feldspäte liegen in einer sehr feinkörnigen Matrix. Die Korngröße der Quarze, bzw, Feldspäte liegt zwischen Silt und Feinsand.

### Tafel 11: Dünnschliff- und REM-Aufnahmen aus Probenstück des Pergamonaltars



**Abb. 1:** Übersicht der Deckschicht des Probenstücks vom Pergamonaltar mit dolomitischen Zuschlag; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 2:** Übergang von der Deckschicht zu dem Zementmörtel des Probenstücks vom Pergamonaltar; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 3:** Klinkerreste im Bindemittel des Zementmörtels im Probenstück vom Pergamonaltar; Durchlicht, Bildbreite 0,79 mm.

**Abb. 4:** Mikrorisse im Bindemittel des Zementmörtels aus dem Probenstück des Pergamonaltars; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

**Abb. 5:** Übergang von Ziegel zu Zementmörtel im Probenstück des Pergamonaltars; REM-Aufnahme (Rückstreuelektronenbild).

## 5.4 Ergebnisse der Ionenchromatographie

In der Tabelle 5.3 sind die Ergebnisse der Ionenchromatographie dargestellt. Analysiert wurden die auslaugbaren Chlorid-, Sulfat- und Nitrat-Gehalte der einzelnen Proben. Mit diesen Werten soll abgeschätzt werden, wie groß die Gefahr einer oberflächennahen Salzbildung ist.

**Tabelle 5.3:** Ergebnisse der Ionenchromatographie (n.a. = unterhalb der Nachweisgrenze).

Probenbezeichnung	Chlorid	Sulfat	Nitrat
	ppm	ppm	ppm
BK I – Marmor	1	16	n.a.
BK I – Ziegel	11	301	n.a.
BK I – Zementmörtel	297	22	5
BK II – Marmor	53	138	3
BK II – Kalkmörtel	77	33	19
BK II – Ziegel	24	327	7
BK II – Zementmörtel	339	32	15
BK III – Kalkmörtel	57	1588	10
BK III – Ziegel	20	9713	13
BK IV – Deckschicht	292	n.a.	209
BK IV – Kalkmörtel 1	528	90	11
BK IV – Kalkmörtel 2	104	3206	43
BK IV – Ziegel	10	274	3
BK V – Zementmörtel	40	23	6
BK V – Kalkmörtel	58	68	15
BK V – Ziegel	18	512	3
BK VI – Beton	23	2162	4
BK VII – Außenputz	53	1587	64
BK VII – Rückwand	27	742	n.a.
PA – Deckschicht	60	411	8
PA – Mörtel	7	34	9
PA – Ziegel	7	1637	2

Im Bohrkern I ist der Chlorid-Gehalt mit 207 ppm im Zementmörtel relativ hoch. Doch nimmt er nach außen über den Ziegel bis zum Marmor ab. Im Marmor ist praktisch kein Chlorid mehr vorhanden. Auch die Sulfatkonzentration ist mit 16 ppm im Marmor unproblematisch. Das Nitrat liegt unterhalb der Nachweisgrenze.

Im Marmor aus Bohrkern II liegen alle drei Anionengehalte höher als im Marmor aus Bohrkern I. Die Sulfatkonzentration hat mit 138 ppm den größten Messwert im Marmor.

Im Bohrkern III sind die Sulfatgehalte mit 9713 ppm im Ziegel und 1588 ppm im

Kalkmörtel sehr hoch. Obwohl die Deckschicht aufgrund des nicht genügend vorhandenen Probenmaterials nicht gemessen werden konnte, kann hier vermutet werden, dass in Anwesenheit von Wasser eine Salzbildung an der Oberfläche sehr wahrscheinlich ist.

An der 1. Säule von links auf der zweiten Ebene des Marktttores, an der Bohrkern IV entnommen wurde, ist eine Salzbildung beobachtet worden. Dabei handelt es sich vermutlich um Chlorid- und Nitrathaltige Salze. In Anwesenheit von Wasser könnte der relativ große Sulfatgehalt von 3206 ppm mobilisiert werden. Zur Zeit konnte kein Sulfat in der Deckschicht nachgewiesen werden.

In den Proben aus Bohrkern V liegen außer der Sulfatwert im Ziegel unterhalb 100 ppm.

Im Beton von Bohrkern VI liegt das Sulfat mit 2162 ppm relativ hoch. Auch im Bohrkern VII wurde der höchste Wert bei dem Sulfat analysiert.

Im Probenstück vom Pergamonaltar wurde im Ziegel eine Sulfatkonzentration von 1637 ppm ermittelt.

Zusammenfassend sind die Nitratkonzentrationen außer im Bohrkern IV sehr niedrig und liegen größtenteils unter 20 ppm. Auch die Chloridgehalte sind außer im Bohrkern IV relativ gering und liegen meist unter 100 ppm. Die Sulfate liegen bei einigen Proben oberhalb 1000 ppm. Doch da Sulfate in der Regel eine geringe Löslichkeit besitzen, ist eine Mobilisierung an die Oberfläche unwahrscheinlich. Auch bei den anderen Salzen ist eine Mobilisierung bei den im Museum herrschenden Luftfeuchtigkeiten (s. Kap. ) kaum denkbar. Die am Gebäude zu beobachteten Salzbildungen sind vermutlich nach dem Bombeneinschlag im zweiten Weltkrieg entstanden, als Regenwasser durch das defekte Dach in das Museum eingedrungen ist.

## 6. Zusammenfassende Interpretation der gefügekundlichen und mineralogischen Eigenschaften

Zusammenfassend können die Materialien des Markttors von Milet grob in sechs verschiedene Gruppen untergliedert werden: Marmor, Deckschichten, Kalkmörtel, Zementmörtel, Beton und Ziegel.

In der Abb. 6.1 wurden die CaO- und Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalte der RFA-Messungen, außer für die Marmore, gegeneinander aufgetragen. Den verschiedenen Geomaterialien können in diesem Diagramm eindeutige Bereiche zugeordnet werden. Die Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalte der Kalkmörtel liegen relativ konstant bei 2 %, dafür ist der Bereich der CaO-Meßwerte von ca. 6,5 – 17,5 % relativ weit streuend. Die Ziegel weisen dahingegen bei den Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Gehalten eine größere Variation auf. Die Deckschichten befinden sich bei relativ hohen CaO-Werten.

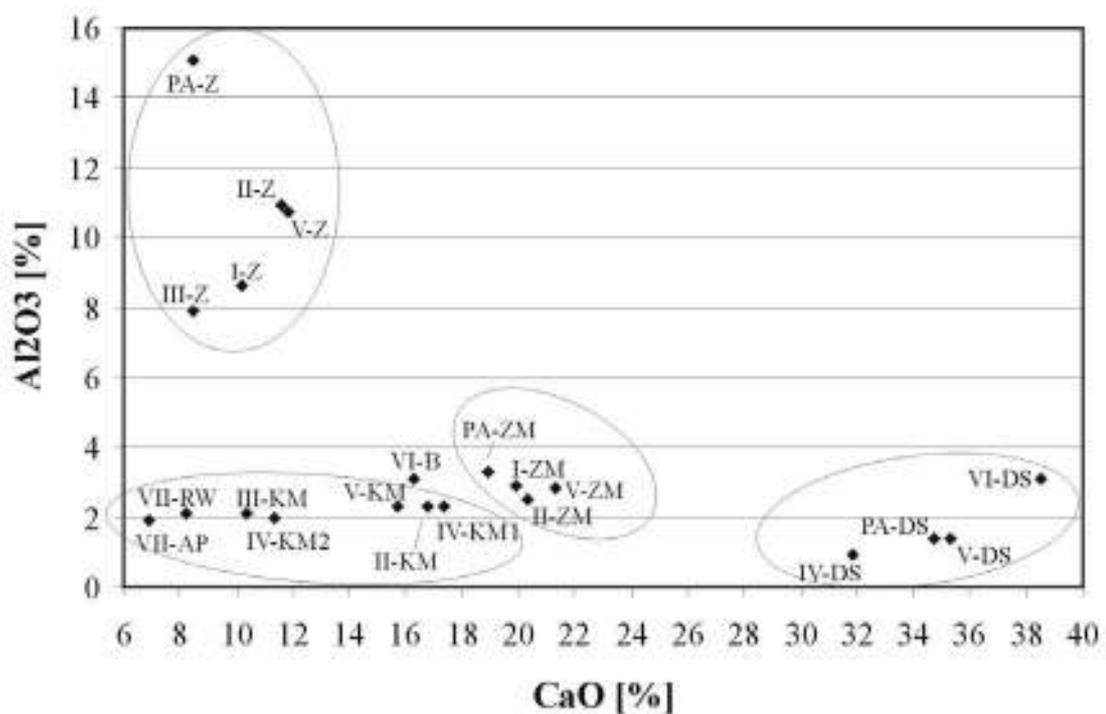


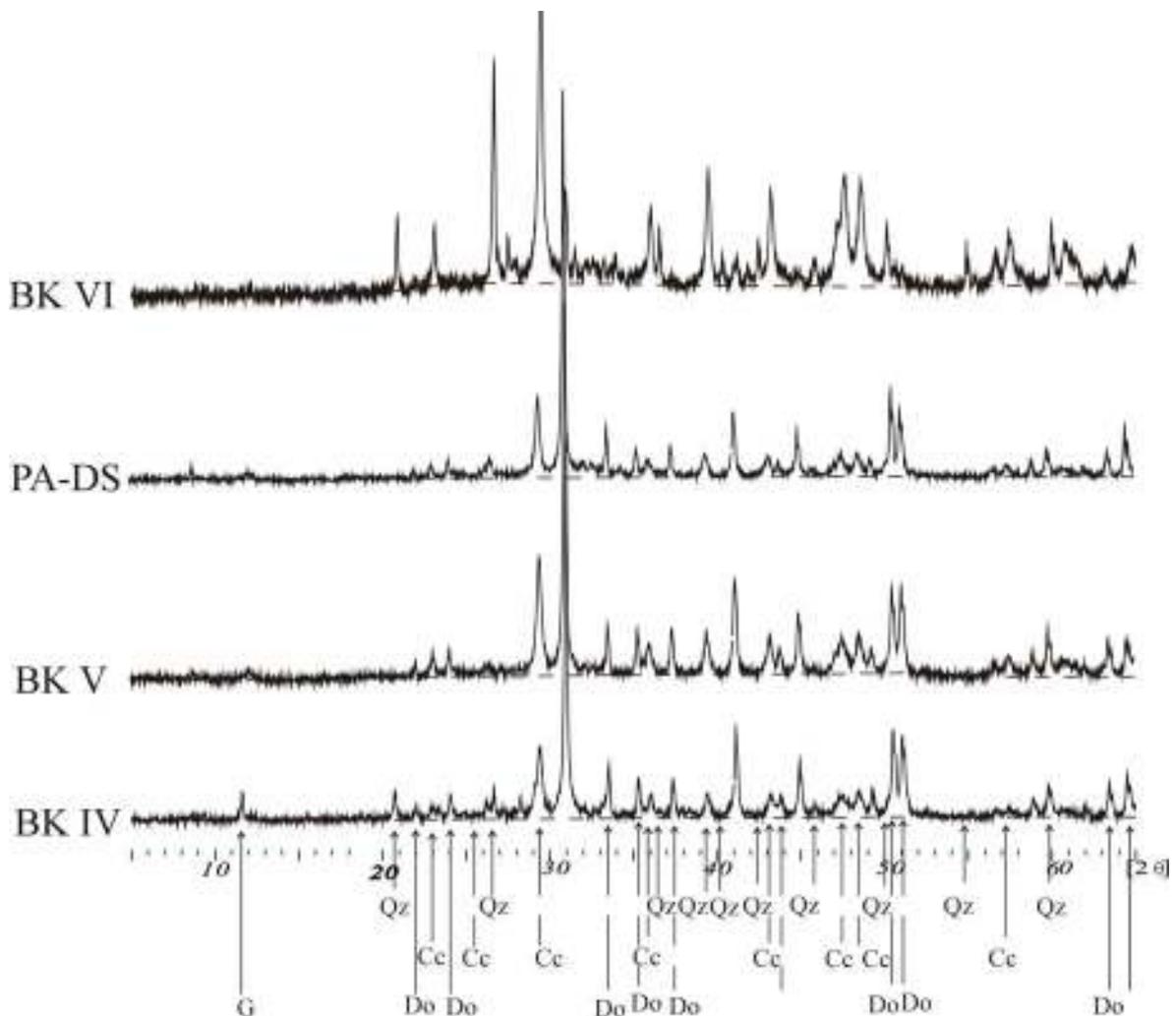
Abb. 6.1: Auftragung der Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- Gehalte gegen die CaO-Gehalte der RFA-Messung.

Die beiden untersuchten Marmore aus Bohrkern I und Bohrkern II sind in ihren gefügekundlichen Eigenschaften und ihrer mineralogischen Zusammensetzung unterschiedlich. Der Marmor aus Bohrkern I ist ein reiner Calcitmarmor und besitzt eine bimodale Korngrößenverteilung. Die Korngrenzen sind gezackt. Im Marmor aus Bohrkern II sind zwei verschieden ausgebildete Gefügebereiche vorhanden. Im Inneren Teil des verbliebenen Marmorstück ist das Korngefüge relativ gleichkörnig. Die Calcitkörner sind polygonal ausgebildet. Im äußeren Bereich des Marmors gibt es eine Kornverkleinerung. Die Korngrenzen sind geschwungen bis eckig. Außerdem wurde ein relativ großer Anteil von  $\text{SiO}_2$  (7,6 %) im Marmor von Bohrkern II festgestellt. Der Dolomitanteil ist bei beiden Marmoren relativ gering. Der MgO-Gehalt bei der RFA-Messung beträgt bei beiden Marmorproben  $\sim 0,2$  %.

Aufgrund des geringen Probenmaterials der Marmore können nur begrenzt Aussagen über die generellen gefügekundlichen Eigenschaften getroffen werden. Z.B. handelt es sich im vorderen Bereich im Marmor aus Bohrkern II vermutlich um eine Scherzone. Weitere Untersuchungen an den Marmoren des Markttors von Milet (Probe 32 und Probe 68) wurden von ROTHERT (2002) durchgeführt. Darin stellt die Probe 32 einen klein- bis mittelkörnigen Calcitmarmor mit dünnen dolomitischen Lagen dar. Das Gefüge wird überwiegend von polygonalen bis interlobaten Kornformen sowie von geschwungenen bis gezackten Korngrenzengeometrien bestimmt. Die Probe 68 stellt einen mittel- bis grobkörnigen, homogenen Calcitmarmor dar. Das Gefüge zeichnet sich durch polygonale Kornformen mit überwiegend geraden Korngrenzen aus.

Die weißen Deckschichten, die in den 20er Jahren verwendet wurden (Bohrkern III, IV und V) und die Deckschicht des Pergamonaltars, repräsentieren einen Kalkmörtel, bei dem sowohl das Bindemittel als auch der Zuschlag fast vollständig aus Kalk, bzw. Dolomit bestehen. Der Zuschlag besteht aus zumeist polygonalen Dolomitkörnern mit einer Korngröße im Bereich von Feinsand. Der  $\text{SiO}_2$ -Anteil ist mit 4,7-6,2 % relativ gering und befindet sich im Bindemittel im Form von Calciumsilikaten. Im Gegensatz dazu besteht der Zuschlag bei der Deckschicht, die bei dem Wiederaufbau in den 50er Jahren des vorigen Jahrhunderts verwendet wurde (Bohrkern VI), aus Quarz und Feldspat. Aus diesem Grund unterscheidet sich die RDA-Aufnahme deutlich von den restlichen Kalkmörteln (s. Abb. 6.2). Die Zuschlagkörner sind gerundet und haben eine Größe von Silt bis Feinsand. Das Bindemittel dieser Deckschicht besteht vermutlich aus Calciumsilikaten und Aluminatferrit. Der Verbund zwischen Zuschlag und Bindemittel ist

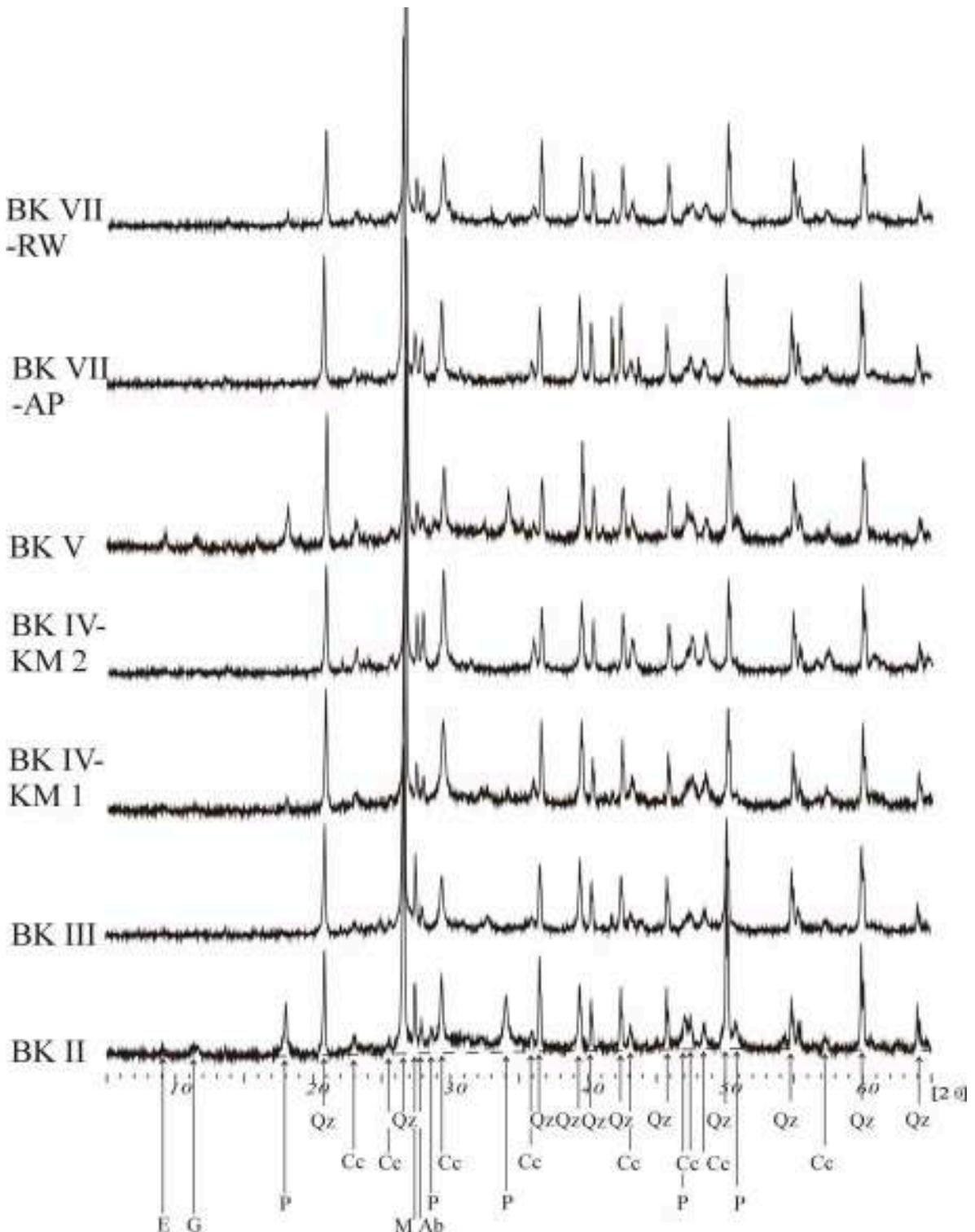
in beiden verwendeten Deckschichten sehr gut.



**Abb. 6.2:** RDA-Aufnahmen der untersuchten Deckschichten vom Markttor von Milet und des Probenstücks vom Pergamonaltar (Qz = Quarz, Cc = Calcit, Do = Dolomit, G = Gips).

Die Kalkmörtel der 20er Jahre besitzen zumeist eine graue Farbe. Der Zuschlag besteht aus Quarzkörnern. Diese besitzen in den meisten Fällen eine eckige Kornform und haben eine Korngröße von Mittelsand. Das Bindemittel besteht aus Kalk und besitzt oft einen geringen hydraulischen Anteil. Bei einigen Kalkmörteln wurden mittels REM-Untersuchungen Klinkerreste nachgewiesen (BK II und BK V). Im Kalkmörtel aus Bohrkern II ist im Bindemittel unter dem REM eine sekundäre Ettringitbildung zu beobachten. Die Röntgenaufnahmen zeigen als Hauptbestandteile Quarz und Calcit (Abb. 6.3). Als Feldspatvertreter wurden Mikroklin und Albit nachgewiesen. In den Kalkmörteln aus Bohrkern II und Bohrkern V wurden zusätzliche Peaks Portlandit, Gips und Ettringit zugeordnet.

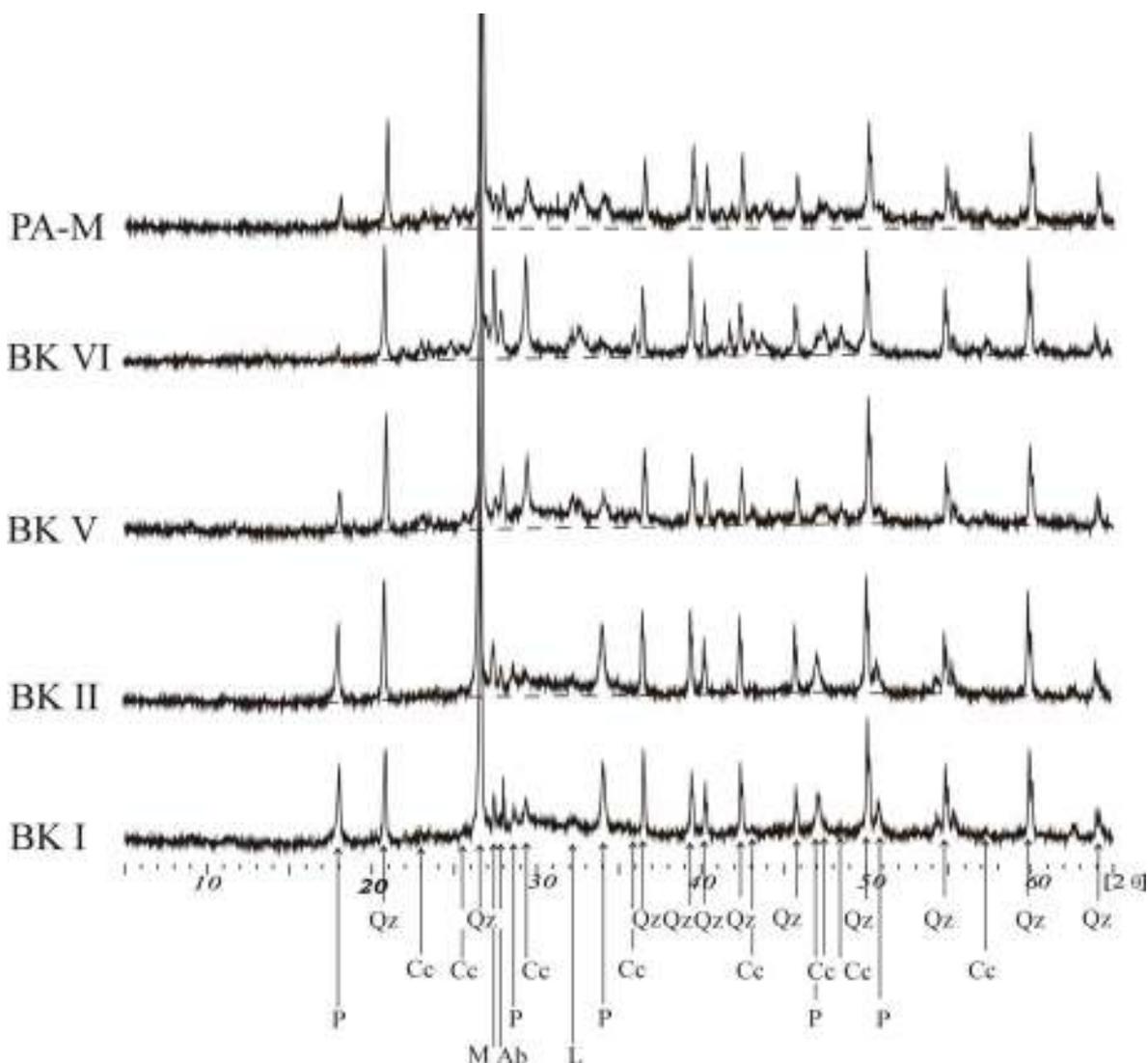
Der Kalkmörtel aus dem Wiederaufbau in den 50er Jahren des 20ten Jahrhunderts besitzt im Vergleich zu den anderen Kalkmörteln ein höheres Zuschlag zu Bindemittel-Verhältnis. Das Bindemittel besitzt einen deutlich hydraulischen bis hochhydraulischen Charakter.



**Abb. 6.3:** RDA-Aufnahmen der untersuchten Kalkmörtel vom Markttor von Milet (Qz = Quarz, Cc = Cacit, P = Portlandit, E = Ettringit, G = Gips, M = Mikroclin, Ab = Albit).

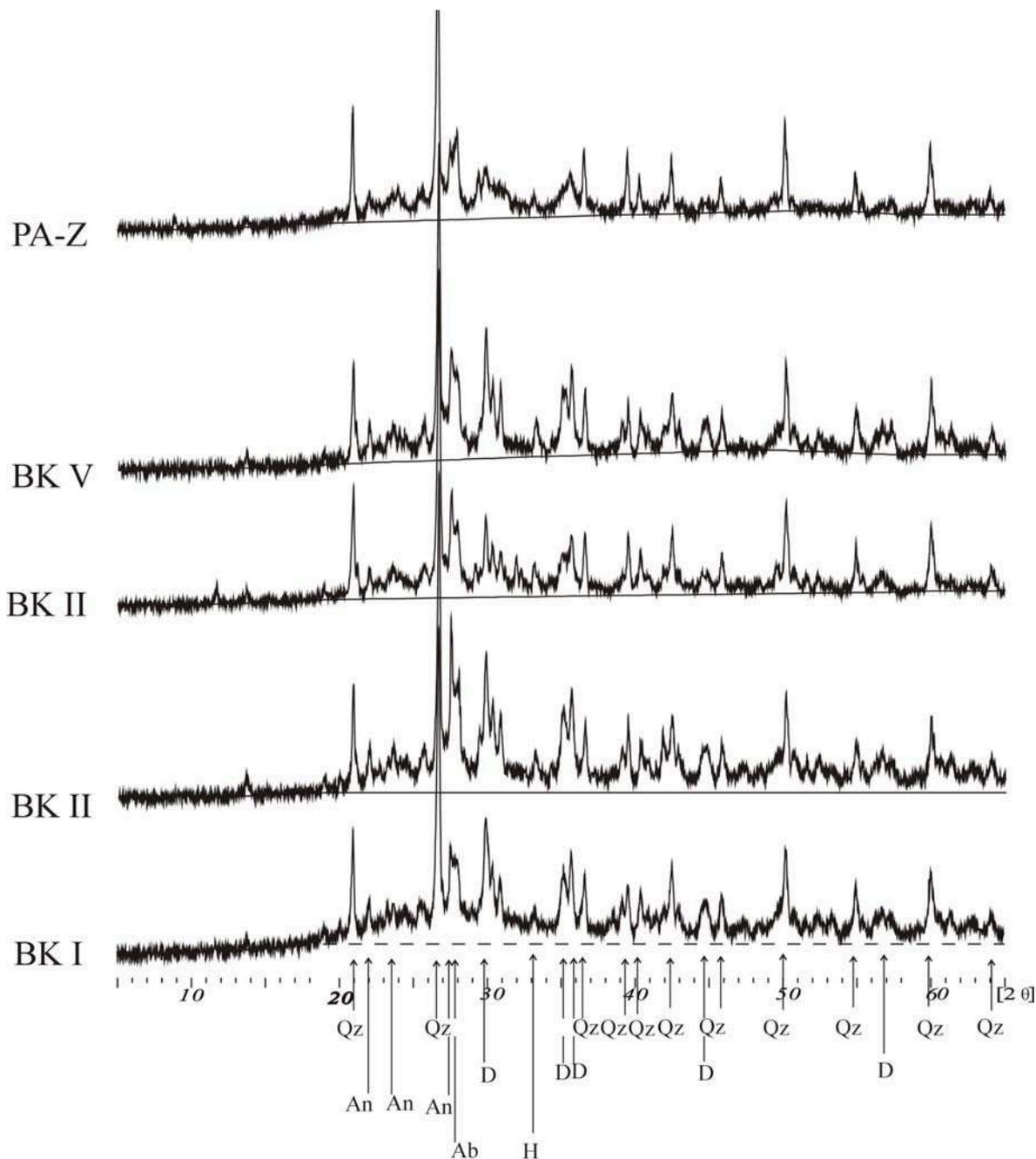
Die Zementmörtel kommen in den Bohrkernen aus dem Aufbau des Markttors in den 20er Jahren und im Probenstück des Pergamonaltars vor. Sie haben eine graue Farbe. Der Zuschlag besteht aus gerundeten bis leicht polygonalen Quarzkörnern mit einer Korngröße im Fein- bis Mittelsandbereich. In den hydraulischen Bindemitteln wurden deutlich CSH-Phasen und Klinkereste nachgewiesen. In den Poren ist oft eine sekundäre Ettringitbildung zu beobachten. Im Unterschied zu den Kalkmörteln wurde in den RDA-Diagrammen ein deutlicher Portlandit-Peak nachgewiesen (Abb. 6.4).

Beton wurde nur im Bohrkern VI verwendet. Dieser stammt aus dem Wiederaufbau in den 50er Jahren. Dieser ähnelt bis auf die Zuschlaggröße den Zementmörteln.



**Abb. 6.4:** RDA-Aufnahmen der untersuchten Zementmörtel und Beton vom Markttor von Milet und des Probenstücks vom Pergamonaltar (Qz = Quarz, Cc = Calcit, P = Portlandit, L = Larnite (Belit), M = Mikroklin, Ab = Albit).

Die Farben der einzelnen Ziegel variieren von gelblich bis orange. In dem Ziegel sind zumeist eckige bis leicht abgerundete Quarzkörner in einer feinkörnigen Matrix. Die Korngrößen der Quarzkörner liegen im Bereich von Silt bis Feinsand. Die Matrix besteht aus Diopsid, Anorthit und Albit. Oft bildet diese Matrix einen Saum um die Quarzkörner, wobei es sich um einen Reaktionsaum handeln könnte. Die RDA-Aufnahmen der einzelnen Ziegel sind der Abb. 6.5 zu entnehmen.



**Abb. 6.5:** RDA-Aufnahmen der untersuchten Ziegel vom Markttor von Milet und des Probenstücks vom Pergamonaltar (Qz = Quarz, D = Diopsid, An = Anorthit, Ab = Albit, H = Hämatit).

## 7. Petrophysikalische Eigenschaften

In diesem Kapitel werden einige petrophysikalische Eigenschaften der Geomaterialien des Markttors von Milet dargestellt. Dazu gehört die Porenradienverteilung und die Bestimmung der Druckfestigkeiten und des dynamischen E-Moduls.

### 7.1 Porenradienverteilung

Die Porenradienverteilung beeinflusst die Wassertransportmechanismen in den Geomaterialien und ist damit z.B. für chemische Lösungsprozesse von Interesse (RÜDRICH, 2003). Untersucht wurden fast alle aus dem Markttor entnommen Geomaterialien. Die Porenradienverteilung wurde mit der Quecksilberdruckporosimetrie am Institut Bauingenieurwesen an der Universität Kassel bestimmt.

In der Abb. 7.1 ist die Porenradienverteilung der gemessenen Proben dargestellt. Dabei wurde zwischen Luftporen (>10.000 nm), Kapillarporen (30 – 10.000 nm) und Gelporen (<30 nm) unterschieden.

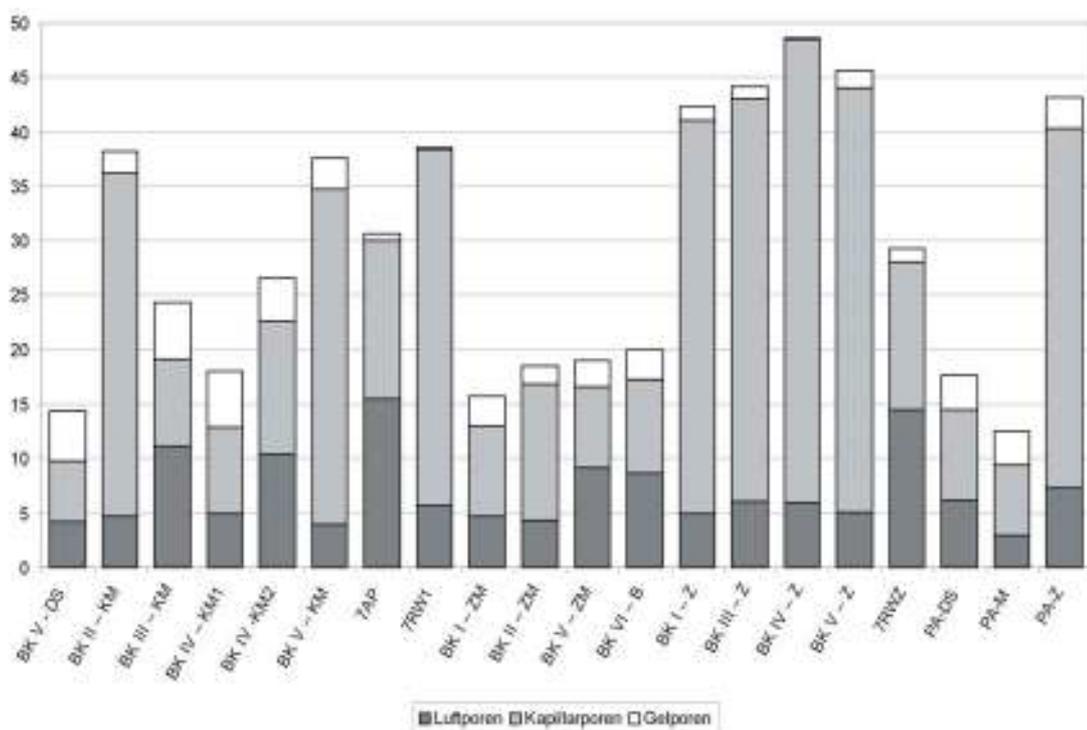


Abb. 7.1: Porenverteilung nach Quecksilberdruckporosimetrie.

Von den Deckschichten des Markttors von Milet konnte nur die Deckschicht von Bohrkern V gemessen werden, da von den weiteren Deckschichten nicht genügend Probenmaterial vorhanden war. Die anderen Deckschichten aus dem Aufbau in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts (Deckschichten aus BK III und BK IV) besitzen ähnliche gefügekundliche und mineralogische Eigenschaften wie die Deckschicht aus Bohrkern V. Daher wird angenommen, dass diese anderen Deckschichten eine ähnliche Porenradienverteilung aufweisen, wie die hier gemessene. Die Gesamtporosität für die Deckschicht aus Bohrkern V beträgt 14,3 %. Diese verteilt sich relativ gleichmäßig auf die Luft-, Kapillar- und Gelporen. Der Anteil der Luftporen erscheint allerdings etwas hoch. Eine mögliche Ursache könnte die Probenpräparation sein.

Die Porenradienverteilung der Kalkmörtel fallen sehr unterschiedlich aus. Die Gesamtporosität reicht von 18,0 % im Kalkmörtel 1 von Bohrkern IV bis 38,2 von Bohrkern II. Die Porenradienverteilungen der Kalkmörtel aus Bohrkern II und Bohrkern V sind sich sehr ähnlich. In beiden Fällen besitzen die Kapillarporen mit ca. 31 % den größten Anteil an der Gesamtporosität. Die Gelporen besitzen mit 2,0 % (BK II), bzw. 2,9 % (BK V) den geringsten Anteil.

Der Unterschied der Gesamtporositäten in den Zementmörteln ist geringer als bei den Kalkmörteln. Die Variationen reichen von 15,8 % in Bohrkern I bis 18,9 % in Bohrkern V. Die Gesamtporosität fällt damit etwas niedriger aus als in den Kalkmörteln.

Die Ziegel aus den Bohrkernen I, III, IV und V besitzen eine große Gesamtporosität von 42,4 % in Bohrkern I bis 48,6 % in Bohrkern IV. In allen diesen Ziegeln besitzen die Kapillarporen den größten Anteil. Eine Ausnahme stellt der Ziegel aus Bohrkern VII dar. Er weist lediglich eine Gesamtporosität von 29,3 % auf.

Die Deckschicht vom Pergamonaltar hat mit 17,6 % eine etwas größere Porosität als die Deckschicht von Bohrkern V aus dem Markttor von Milet. Der Mörtel ist mit einer Gesamtporosität von 12,6 % relativ gering porös. Die Porosität des Ziegels liegt mit 43,1 % in dem Bereich der Ziegel der Bohrkern vom Markttor aus dem Aufbau in den 20er Jahren.

Die Summe aller Poren gibt die Gesamtporosität der Proben wieder. Bei den Luftporen handelt es sich oft größtenteils um Oberflächeneffekte, die durch die Probenpräparation verursacht worden sind. Dadurch ist die Gesamtporosität etwas erhöht.

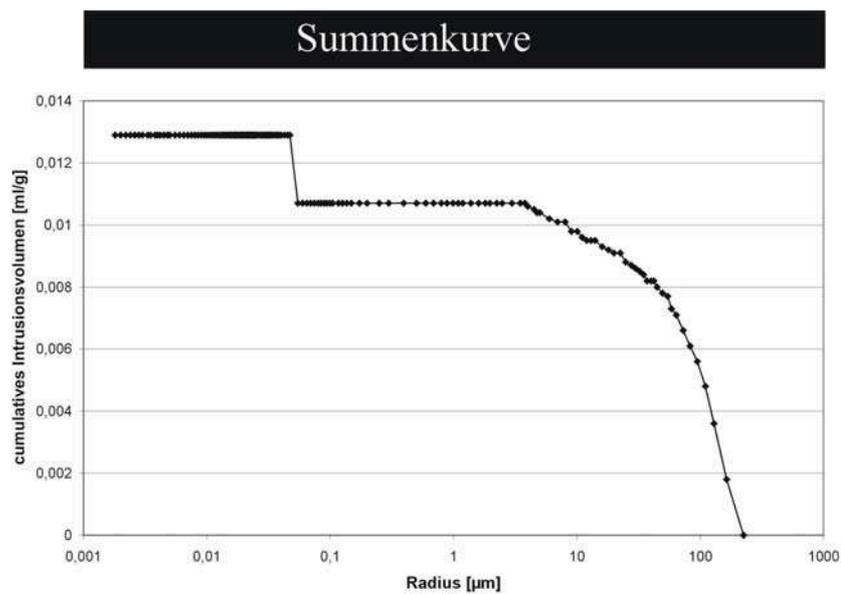
Vor allem für die Marmore hat sich diese Art der Probenpräparation als nachteilig

herausgestellt. In der Abb. 7.2 ist die gemessene Porenradienverteilung des Marmors aus Bohrkern I dargestellt. In dieser ist eine Zunahme der Porenradienverteilung ab einem Porenradius von ca. 3  $\mu\text{m}$  zu beobachten. Das Maximum wird bei einem Porenradius von ca. 130  $\mu\text{m}$  erreicht. Poren dieser Größe sind für Marmore allerdings unrealistisch, da bei einer Öffnung der Mikrorisse über 10  $\mu\text{m}$  mit einer vollständigen Entfestigung der Marmore zu rechnen ist (vgl. RÜDRICH, 20039. Es handelt sich hierbei wahrscheinlich um Oberflächeneffekte, welche durch die Probenpräparation erzeugt werden.



**Abb. 7.2:** Porenradienverteilung des Marmors aus Bohrkern I.

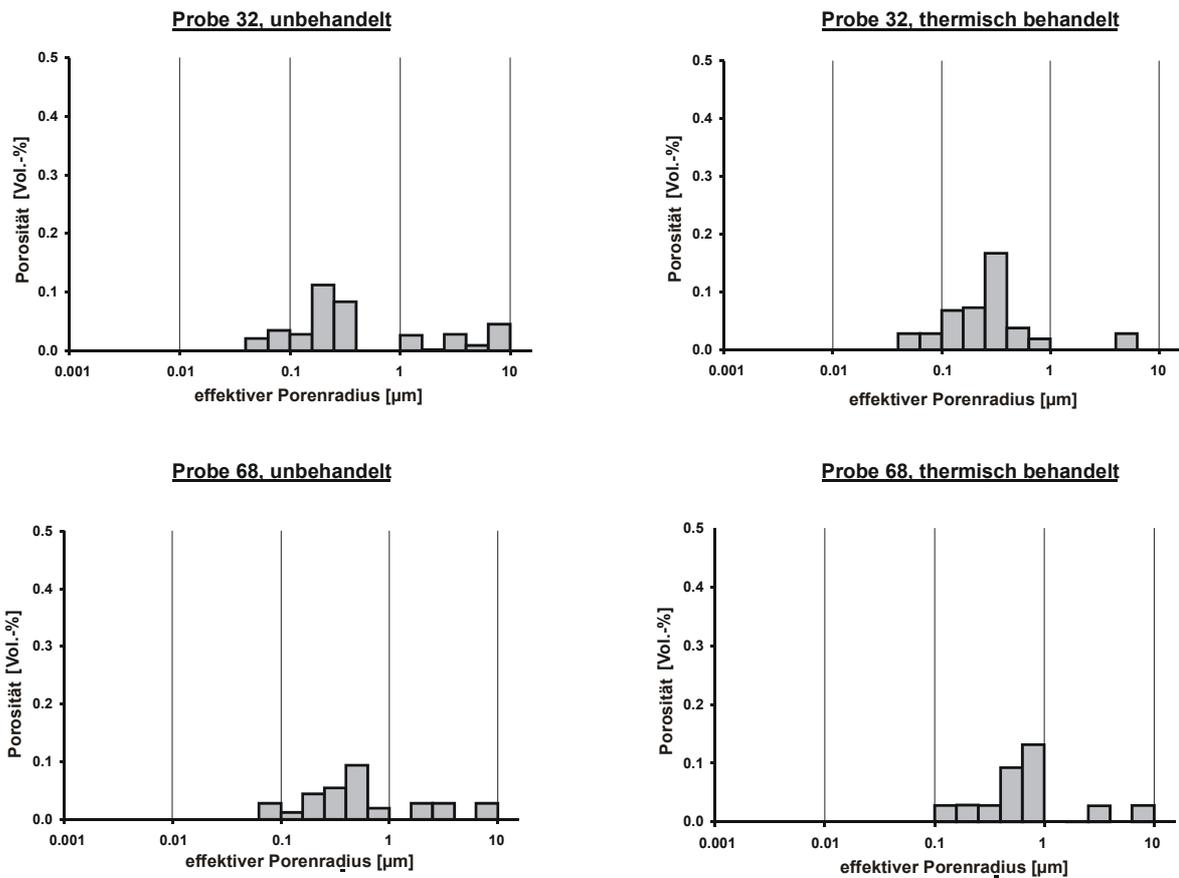
Der Peak bei ca. 0,05 wurde wahrscheinlich durch einen Messfehler verursacht. Dies ist insbesondere an der Summenkurve dieser Probe zu erkennen (s. Abb. 7.3).



**Abb. 7.3:** Summenkurve des Marmors aus Bohrkern I.

Eine realistischere Porengrößenverteilung von Marmoren aus dem Marktort von Milet zeigen die Messungen aus ROTHERT (2002) (Abb. 7.4). Dabei liegt das Porengrößenmaximum der Probe 32 im Bereich von 0,2 – 0,4 µm und der Probe 68 im Bereich von 0,4 – 0,8 µm. Durch eine thermische Beanspruchung steigen die Porengrößenmaxima bei beiden Proben deutlich an.

Doch da diese Messung der Porenradienverteilung mit der gleichen Probenpräparation durchgeführt wurden, sind auch diese Ergebnisse kritisch zu betrachten, z.B. sind die nachgewiesenen Porenradien von > 1 µm für Marmore unrealistisch.



**Abb. 7.4:** Verteilung der Porenradieverteilung von unbehandelten und thermisch beanspruchten Marmorproben des Markttores von Milet (aus: ROTHERT, 2002).

## 7.2 Druckfestigkeiten und dynamischer E-Modul

Die Druckfestigkeiten und der dynamische Elastizitätsmodul (E-Modul) konnten lediglich an drei Proben des Markttores von Milet gemessen werden (s. Tabelle 7.1). Dazu gehören zwei Ziegel jeweils aus Bohrkern II und Bohrkern III und ein Zementmörtel aus Bohrkern V. Von den anderen Proben war nicht genügend Probenmaterial vorhanden.

**Tabelle 7.1:** Gemessene Druckfestigkeiten und dynamische E-Module.

Probenbezeichnung	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	dyn. E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
BK II - Ziegel	12,9	7218
BK III - Ziegel	9,9	6946
BK V - Zementmörtel	28,4	44700

Die Tabelle 7.2 zeigt die Druckfestigkeitsklassen nach der DIN 105 für Ziegel. Dabei gibt die niedrigste Druckfestigkeit (der kleinste Einzelwert) in  $\text{N/mm}^2$  die Druckfestigkeitsklasse an. Danach liegt der Ziegel aus Bohrkern II mit einem Wert von  $12,9 \text{ N/mm}^2$  in der Druckfestigkeitsklasse 12 und der Ziegel aus Bohrkern III mit einem Wert von  $9,9 \text{ N/mm}^2$  in der Druckfestigkeitsklasse 8.

**Tabelle 7.2:** Druckfestigkeitsklassen nach DIN 105.

Druckfestigkeit in $\text{N/mm}^2$		Farbkennzeichnung
Mittelwert	kleinster Einzelwert	
2,5	2,0	grün
5,0	4,0	blau
7,5	6,0	rot
10,0	8,0	Stempel schwarz
15,0	12,0	----
25,0	20,0	gelb
35,0	28,0	braun
45,0	36,0	violett
60,0	48,0	2 schwarze Streifen
75,0	60,0	3 schwarze Streifen

Die Tabelle 7.3 zeigt die Festigkeitsanforderungen nach DIN 1053 für Mörtel. Demnach gehört der Zementmörtel aus Bohrkern V mit einer Druckfestigkeit von  $28,4 \text{ N/mm}^2$  zu der Mörtelgruppe III. Gemäß der DIN 1053 basiert die Mörtelgruppe III auf Zement als Bindemittel.

**Tabelle 7.3:** Festigkeitsanforderungen nach DIN 1053

Mörtelgruppe	Mindestdruckfestigkeit nach 28 Tagen [ $\text{N/mm}^2$ ]	Mindesthaftscherfestigkeit [ $\text{N/mm}^2$ ]
I	keine	keine
II	2,5	0,1
IIa	5	0,2
III	10	0,25

## 8. Fallstudie 1: Ultraschallgeschwindigkeitsmessungen an mörtelgefüllten Marmorhohlzylindern in verschiedenen Erhaltungszuständen

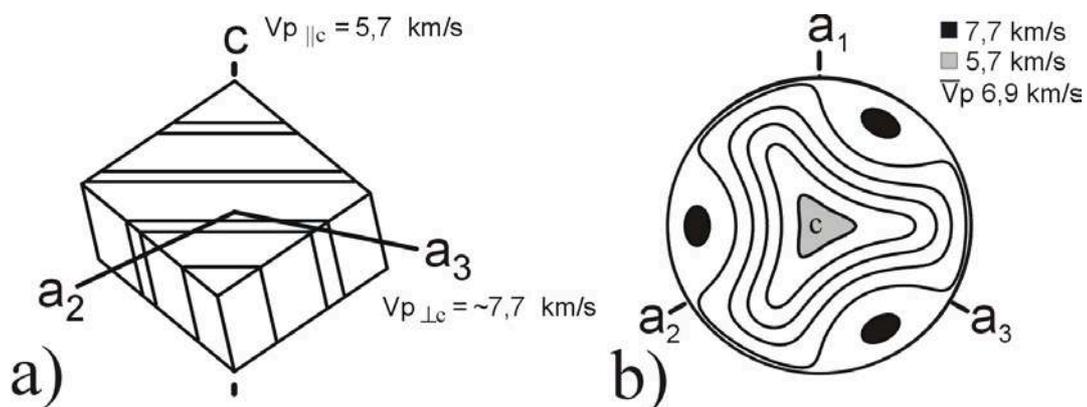
In dieser Fallstudie soll die Verträglichkeit zwischen ausgewählten Marmoren des Markttors von Milet und den Favoritenmischungen der Mörtel aus der Arbeit von MAACK (2003) überprüft werden. Um dies zu ermitteln werden die Ultraschallgeschwindigkeiten an künstlich verwitterten und an konservierten Proben gemessen.

Die Ultraschallgeschwindigkeitsanalyse ist eine indirektes Verfahren, dessen Vorteil in der zerstörungsfreien Anwendbarkeit liegt. Dabei wird angenommen, dass die Kompressionswellengeschwindigkeit ( $V_p$ ) über die Änderung der Porosität bzw. der Dichte mit dem Verwitterungszustand korreliert (DÜRRAST, 1999). KÖHLER (1991) stellte eine Schadenstypen-Klassifizierung für Marmor auf, in welcher der Zusammenhang im wesentlichen zwischen den Ultraschallgeschwindigkeiten der Kompressionswellen und der Porosität beruht (DÜRRAST, 1999). Die Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeiten bei verwitterten Marmoren resultiert dabei aus einem verwitterungsbedingten Mikrorisswachstum (z.B, WEISS et al., 2001). In Tabelle 8.1 sind Ultraschallgeschwindigkeiten der Kompressionswellen ( $v_p$ ) und Porositäten von ausgewählten Marmorproben in verschiedenen Erhaltungszuständen dargestellt (aus: RÜDRICH, 2003).

**Tabelle 8.1:**  $V_p$ -Eigenschaften und Porositäten ausgewählter Marmorproben (aus: RÜDRICH, 2003).

Marmortyp	Proben-zustand	Porosität [Vol.-%]	$V_{pmax}$ [km/s]	$V_{pmin}$ [km/s]
Carrara	frisch	0,20	6,42	6,16
	verwittert	0,43	4,50	4,07
	stark verwittert	2,12	2,44	1,63
Prieborn	verwittert	0,55	3,97	2,93
Kauffung	frisch	0,23	6,58	5,43
	verwittert	0,37	6,14	5,48
Grosskunzendorf	frisch	0,31	5,05	4,37
	verwittert	0,77	4,84	2,45
Lasa	frisch	0,33	5,68	5,03
	verwittert	0,45	4,48	3,77
Sterzing	frisch	0,30	6,40	4,87
	verwittert	0,49	5,00	4,44

Zeigt ein Marmor eine Textur bzw. -Foliation, so ist zu beachten, dass die Ultraschallgeschwindigkeiten in verschiedenen Raumrichtungen unterschiedlich sein können, da sich ein Calcit-Einkristall in seinen Ultraschallgeschwindigkeiten stark anisotrop verhält (s. Abb. 8.1). In einem Calcit-Einkristall können für Kompressionswellen parallel zur c-Achse relativ langsame Geschwindigkeiten mit 5,7 km/s und sehr hohe von 7,7 km/s parallel zu den a-Achsen festgestellt werden (DANDEKAR, 1968).



**Abb. 8.1:** Beziehung zwischen kristallographischen und physikalischen Eigenschaften des Calcit-Einkristall; a) Kompressionswellengeschwindigkeit parallel zu den jeweiligen Kristallachsen sowie b) Geschwindigkeitsverteilung (P-Welle) in einem Calcit-Einkristall (Schmidt'sches Netz, untere Halbkugel; modifiziert nach JOHNSON & WENK, 1985).

Für die vorliegende Studie wurden in zahlreiche Hohlzylinder zweier verschiedener original Marmore des Markttors von Milet ausgewählte Ersatzmörtel (MAACK, 2003) gefüllt. Diese Probenform stellt die Säulensituation am Markttor im Kleinformat dar. Die eine Marmorart ist ein klein- bis mittelkörnigen Marmor mit dünnen dolomitischen Lagen (Probe 32) und der andere ist ein homogener mittel- bis grobkörnigen Calcitmarmor (Probe 68). Die genauen gefügekundlichen und gesteintechnischen Eigenschaften dieser Marmore können der Arbeit von ROTHERT (2002) entnommen werden.

Für beide Marmorhohlzylinder wurden jeweils zwei Mörtelbefüllungstechniken durchgeführt. Die ersten Zylinder wurden mit Mörtel gefüllt und ohne weitere Behandlung an der Luft trocknen lassen. Die restlichen Zylinder wurden einer Nachbehandlung unterzogen, indem sie nach der Mörtelbefüllung mit Plastikfolie abgedeckt und 7 Tage bei einer Temperatur von 20°C (±2°C) und 60% (±5%) relativer Luftfeuchte gelagert wurden. Später wurden einige der Zylinder im Klimaschrank künstlich verwittert, indem sie mehreren Temperaturzyklen von jeweils 90°C bis -25°C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 90% ausgesetzt wurden. Einige dieser thermisch beanspruchten

Zylinder und einige unbehandelte Zylinder wurden dann einer Ibach-Volltränkung mit Acrylharz unterzogen. Eine detaillierte Beschreibung dieses Verfahrens ist in WIHR (1995), AURAS et al. (1997) und in LORENZ & IBACH (1999) zu finden. Die imprägnierten Zylinder wurden anschließend nochmals im Klimaschrank thermisch beansprucht (5 Zyklen von jeweils 90°C bis -25°C bei 90% relativer Luftfeuchte). Nach jeder Beanspruchung sowie nach der Konservierung wurden die Kompressionswellengeschwindigkeiten ermittelt.

## 8.1 Makroskopische Beobachtungen

Auffällig bei beiden Versuchsreihen war eine Gelbfärbung der Marmore nach einigen Tagen nach Einfüllen des Frischmörtels (s. Tafel Abb. 1 und 4). Die Gelbfärbung fällt bei dem feinkörnigen Marmor (Probe 32) stärker aus als bei dem gröberen reinen Calcitmarmor (Probe 68). Sie wird wahrscheinlich durch im Mörtel vorhandenes Wasser verursacht. Dabei tritt bei Probe 68 die Gelbfärbung schneller ein. Der gröbere Calcitmarmor zeigt eine schnellere Wasseraufnahme im Kontakt mit dem Frischmörtel. Diese schnellere Wasseraufnahme ist vermutlich auf die deutliche Kornentfestigung des Calcitmarmors zurückzuführen und führt wahrscheinlich auch zu einer schnelleren Trocknung des Marmors. Nach mehreren Tagen ist die Gelbfärbung fast völlig verschwunden.

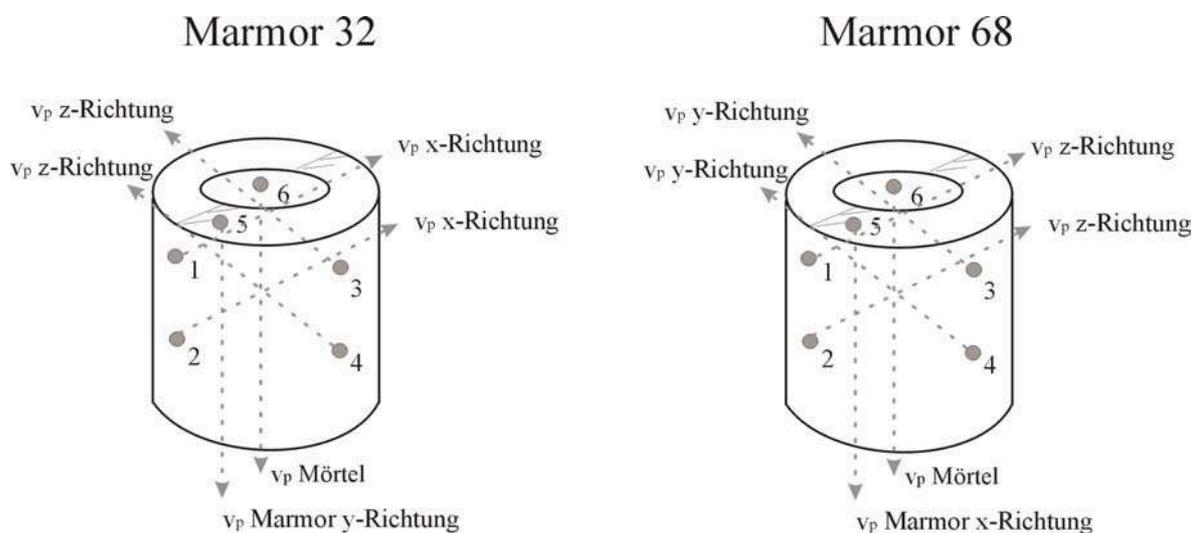
Das schnellere Aushärten des Mörtels bei der Lufttrocknung führt zu einem Abreißen der Kontaktfläche zwischen Marmor und Mörtel (s. Tafel Abb. 2 und 5). Dieses Phänomen ist die Folge eines Schwindens des Mörtels. Dabei ist die Rissbildung in dem feinkörnigem Marmor der Probe 32 stärker ausgeprägt. Die Zylinder mit dem langsameren Abbinden unter der Plastikfolie zeigen keine Rissbildung (s. Tafel Abb. 3 und 6). Durch das Abdecken des Mörtels und der Lagerung im Klimaschrank wird das Schwinden erheblich reduziert (MAACK, 2003).

Nach der ersten thermischen Verwitterung der Proben konnte makroskopisch keine Veränderung festgestellt werden.

Die Tränkung der Zylinder mit der Ibach-Methode führt bei den Marmoren zu einer leicht glänzenden bis speckigen Oberfläche. Die vor der Tränkung noch leichte Gelbfärbung des feinkörnigeren Dolomitmarmores ist nach der Tränkung vollständig verschwunden. Dies ist vermutlich auf die vorangegangene Trocknung (Teilprozess des Ibach Verfahrens) des Materials zurückzuführen.

## 8.2 Ergebnisse der Ultraschallmessungen

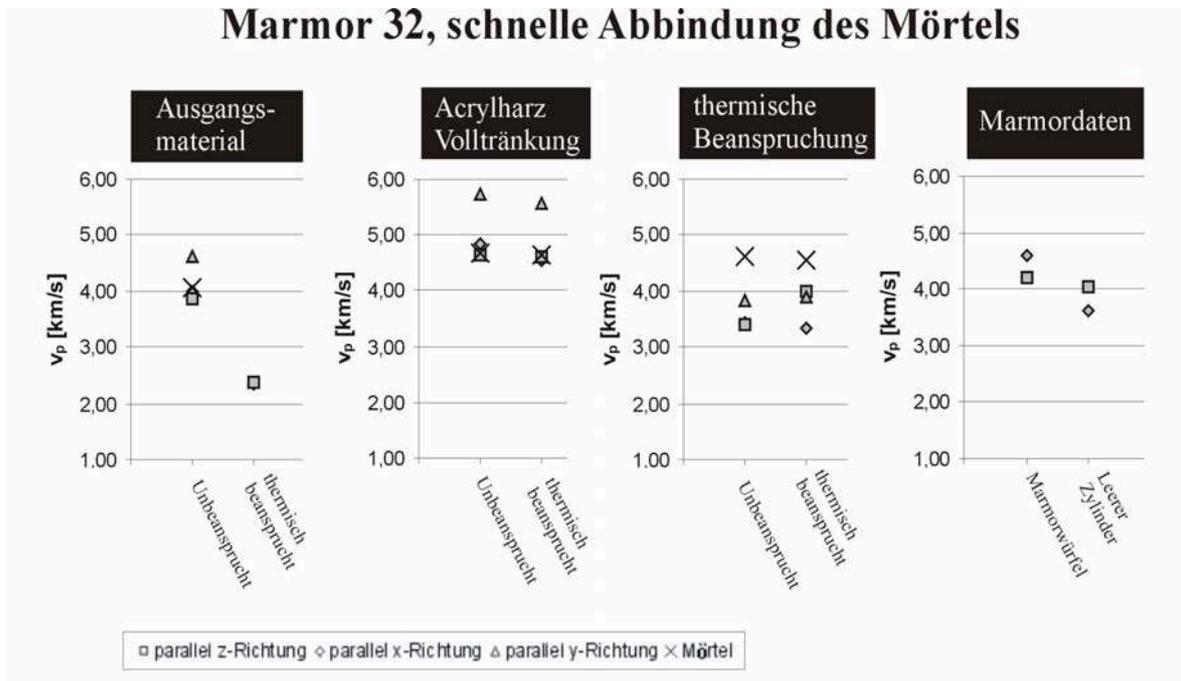
Die Zylinder wurden jeweils in allen drei Richtungen durchschallt. Die genauen Messpunkte sind der Abb. 8.2 zu entnehmen. Bei den Messpunkten eins und zwei, bzw. drei und vier, wurden jeweils die Mittelwerte dieser Messungen berechnet. Die Durchschallungsstrahlengänge der Punkte fünf und sechs zeigen die Geschwindigkeiten vom Marmor, bzw. Mörtel. Die Durchschallungsstrahlengänge der Punkte 1 -4 verlaufen durch Marmor und Mörtel.



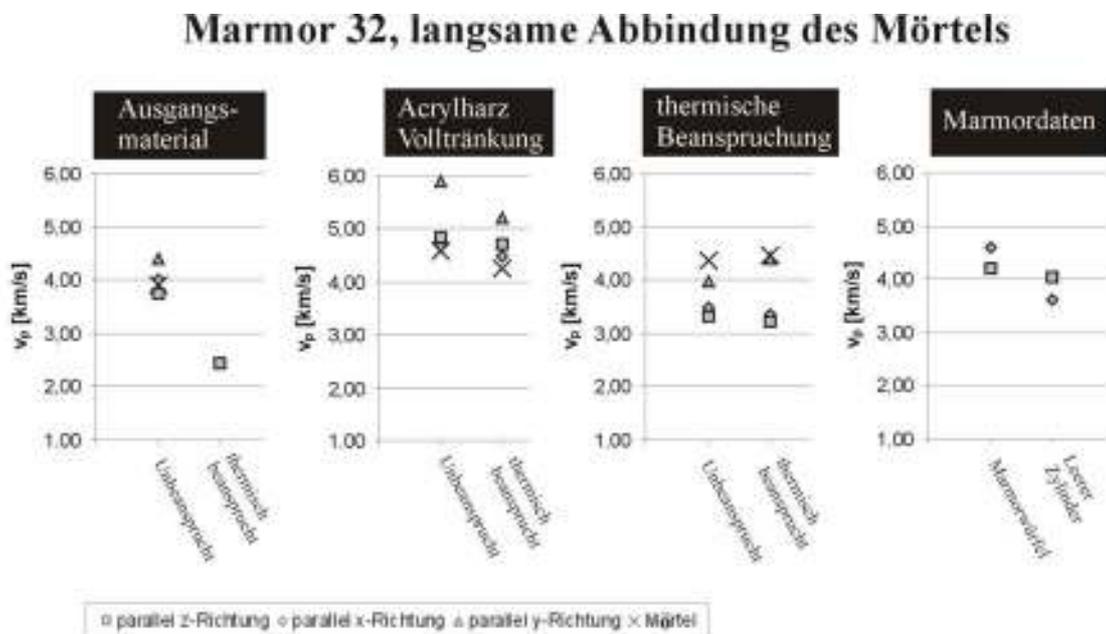
**Abb. 8.2:** Richtungen der gemessenen P-Wellen an mit Mörtel befüllten Marmorhohlzylindern.

In den folgenden Abbildungen (Abb. 8.3 – Abb. 8.6) sind die gemessenen Kompressionswellengeschwindigkeiten aufgezeichnet. Die Zylinder wurden dabei getrennt nach der Marmorart (Probe 32: Abb. 8.3 und Abb. 8.4; Probe 68: Abb. 8.5 und Abb. 8.6) und einer schnellen bzw. langsamen Abbindeung des Mörtels betrachtet. Dabei wurden die Messergebnisse für die verschiedenen Marmorzylinder in den verschiedenen Erhaltungszuständen (Ausgangsmaterial mit thermischer Beanspruchung – Acrylharzvolltränkung – 2. thermische Beanspruchung) nebeneinander dargestellt. So lassen sich die Ergebnisse leicht miteinander vergleichen.

Eine thermische Beanspruchung der Zylinder führt zu einer starken Abnahme der Ultraschallgeschwindigkeiten. Die anschließend konservierten Proben besitzen deutlich höhere  $V_p$ -Eigenschaften. Eine erneute thermische Beanspruchung führt bei dem Marmor zu einer Geschwindigkeitsreduktion. Die Kompressionswellengeschwindigkeiten der Mörtel ändern sich durch die thermische Beanspruchung kaum. Generell zeigen die Marmorzylinder der Probe 68 langsamere  $V_p$ -Eigenschaften als die Zylinder der Probe 32.



**Abb. 8.3:** Kompressionswellengeschwindigkeiten im mit Mörtel befüllten Hohlzylindern der Marmorprobe 32 mit schneller Aushärtung des Mörtels an der Luft.



**Abb. 8.4:** Kompressionswellengeschwindigkeiten im mit Mörtel befüllten Hohlzylindern der Marmorprobe 32 mit langsamer Aushärtung des Mörtels mittels Abdeckung mit Plastikfolie und Lagerung im Klimaschrank.

### Marmor 68, schnelle Abbindung des Mörtels

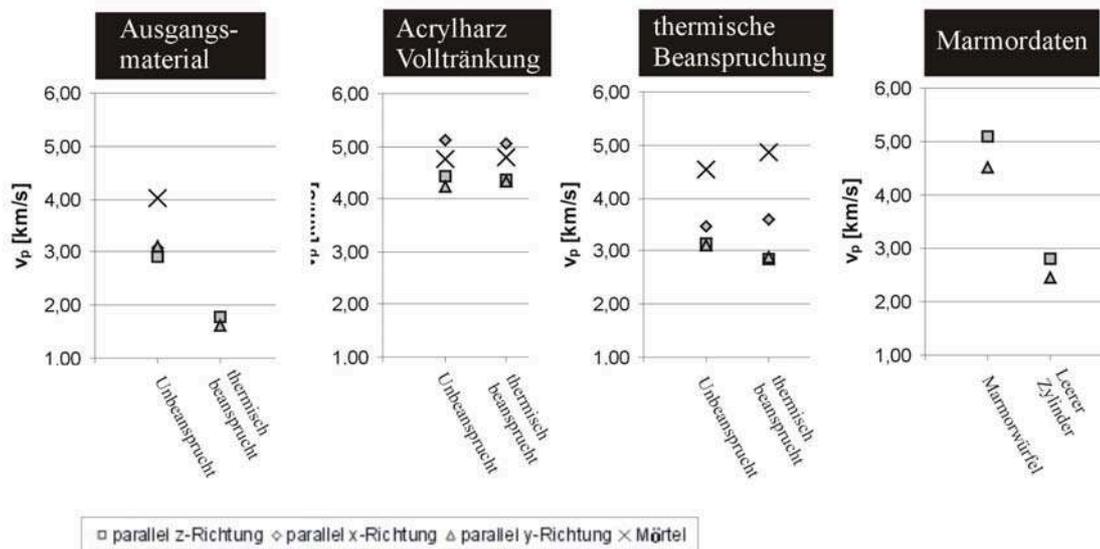


Abb. 8.5: Kompressionswellengeschwindigkeiten im mit Mörtel befüllten Hohlzylindern der Marmorprobe 68 mit schneller Aushärtung des Mörtels an der Luft.

### Marmor 68, langsame Abbindung des Mörtels

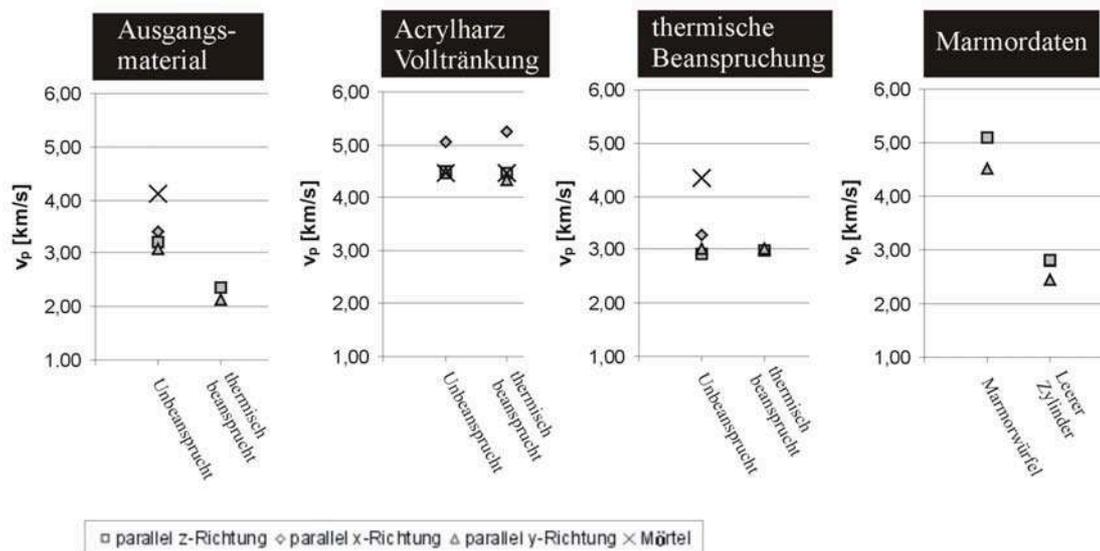


Abb. 8.6: Kompressionswellengeschwindigkeiten im mit Mörtel befüllten Hohlzylindern der Marmorprobe 68 mit langsamer Aushärtung des Mörtels mittels Abdeckung mit Plastikfolie und Lagerung im Klimaschrank.

Im Zylinder der Probe 32 mit schnellem Abbinden des Mörtels an der Luft sinkt die P-Wellengeschwindigkeit der thermisch beanspruchten Probe von ursprünglich ca. 4 km/s in x- und y-Richtung um ca. 1,6 km/s auf 2,4 km/s. Die Ibach-Tränkung bewirkt bei beiden Zylindern, der unbeanspruchten und thermisch verwitterten Probe, einen starken Anstieg der Geschwindigkeiten auf ca. 4,6 km/s in x- und y-Richtung. Eine anschließende thermische Beanspruchung der Zylinder führt zu einem Messwert von ca. 3,4 km/s bei beiden gefüllten Zylindern. Damit liegt die P-Wellengeschwindigkeit der ursprünglich schon thermisch beanspruchten Probe nach der Acrylharz-Volltränkung und der erneuten thermischen Beanspruchung immer noch höher als das Ausgangsmaterial.

Zwischen der schnellen Abbindung des Mörtels und der langsamen Abbindung (Abdeckung mit Plastikfolie) ist kein signifikanter Unterschied feststellbar. Im Vorfeld wurde eine langsamere Geschwindigkeit des Zylinders mit dem schnellen Austrocknen des Mörtels aufgrund der Rissbildung vermutet. Diese Vermutung konnte allerdings nicht bestätigt werden.

Die Ultraschallgeschwindigkeiten in den Zylindern der Probe 68 liegen generell etwas niedriger als in den Zylindern der Probe 32 (außer die P-Wellengeschwindigkeiten des Mörtels). Die Tendenzen sind allerdings dieselben. Die Geschwindigkeiten der thermisch beanspruchten Proben mit der schnellen Abbindung liegen mit ca. 1,7 km/s in z- und y-Richtung um ungefähr 1,3 km/s niedriger als die unbeanspruchten Proben (ca. 3,0 km/s). Die Tränkung führt zu Geschwindigkeiten der P-Wellen um die 4,3 km/s in z- und y-Richtung. Die nach der Imprägnierung thermisch beanspruchten Zylinder besitzen Geschwindigkeiten von 2,9-3,1 km/s. Auch mit den Zylindern der Probe 68 ist kein signifikanter Unterschied zwischen einem schnellem und einem langsamen Aushärten des Mörtels aufgefallen.

Als nachteilig für die Messung der Verträglichkeit hat sich die Probengeometrie herausgestellt. Die wesentliche Bedeutung besitzen dabei die relativ hohen Ultraschallgeschwindigkeiten der Marmore. So ist insbesondere bei den Zylindern mit der Probe 32 möglich, dass der Schall durch den Marmor früher am Empfänger eintrifft als derjenige, der durch Marmor und Mörtel verläuft. Der direkte Vergleich zwischen den Ultraschallgeschwindigkeiten des Zylinders im Ausgangszustand und eines ungefüllten Marmorzylinders der Probe 32 zeigt keine signifikanten Unterschiede. Die

Geschwindigkeitskontraste zwischen Marmor und Mörtel existieren dabei nur in dem Maße im Ausgangszustand der Zylinder. Bei thermischer Beanspruchung sollten die  $V_p$ -Eigenschaften von Marmor sehr stark reduziert sein (vgl. WEISS et al., 2001), da Marmore sehr sensibel auf Temperaturereignisse reagieren. Um diesen Problem aus dem Weg zu gehen wurde versucht, jeweils zwei Seiten eines Zylinders abzusägen. Doch dieser Versuch ist an dem Auseinanderfallen des Mörtels und Marmors während des Sägevorganges gescheitert.

**Tafel 12: Mit Mörtel verfüllte Marmorhohlzylinder**

**Abb. 1:** Gelbfärbung in der Marmorprobe 32, 4 Tage nach Einfüllen des Mörtels.

**Abb. 2:** Schnelle Aushärtung des Mörtel in der Probe 32 mit Abreißen der Kontaktfläche Marmor – Mörtel infolge von Schwinden.

**Abb. 3:** Langsame Aushärtung des Mörtels in der Probe 32.

**Abb. 4:** Gelbfärbung in der Marmorprobe 68, 4 Tage nach Einfüllen des Mörtels.

**Abb. 5:** Schnelle Aushärtung des Mörtel in der Probe 68 mit Abreißen der Kontaktfläche Marmor – Mörtel infolge von Schwinden.

**Abb. 6:** Langsame Aushärtung des Mörtels in der Probe 68.

**Tafel 13: Mit Acrylharz getränkte Zylinder**

**Abb. 1:** schnelle Aushärtung im Marmor 32 mit anschließender Tränkung in Acrylharz.

**Abb. 2:** langsame Aushärtung im Marmor 32 mit anschließender Tränkung in Acrylharz.

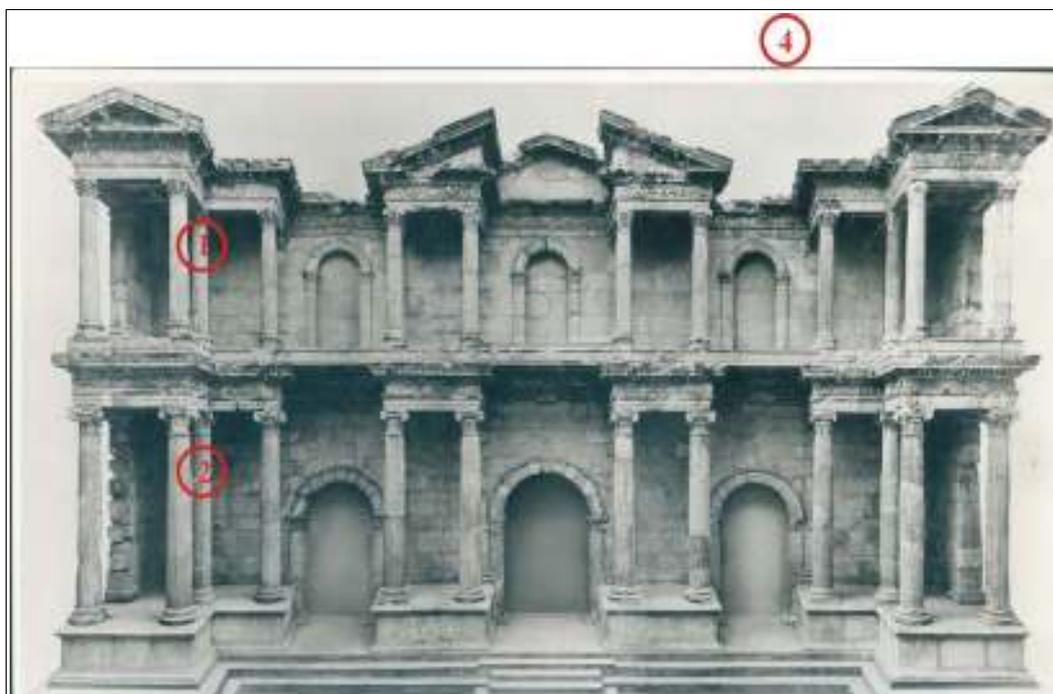
**Abb. 3:** schnelle Aushärtung im Marmor 68 mit anschließender Tränkung in Acrylharz.

**Abb. 4:** langsame Aushärtung im Marmor 68 mit anschließender Tränkung in Acrylharz.

## 9. Klimasituation am Markttor von Milet im Pergamonmuseum

Um herauszufinden, welchen Temperaturschwankungen und Luftfechtigkeiten das Markttor von Milet im Pergamonmuseum ausgesetzt ist wurden diese Parameter über einen längeren Zeitraum hinweg gemessen. Weiter sollte herausgefunden werden durch welche äußeren Einflüsse (Zahl der Besucher, Außentemperatur und -luftfeuchte) das Klima im Museum gesteuert wird.

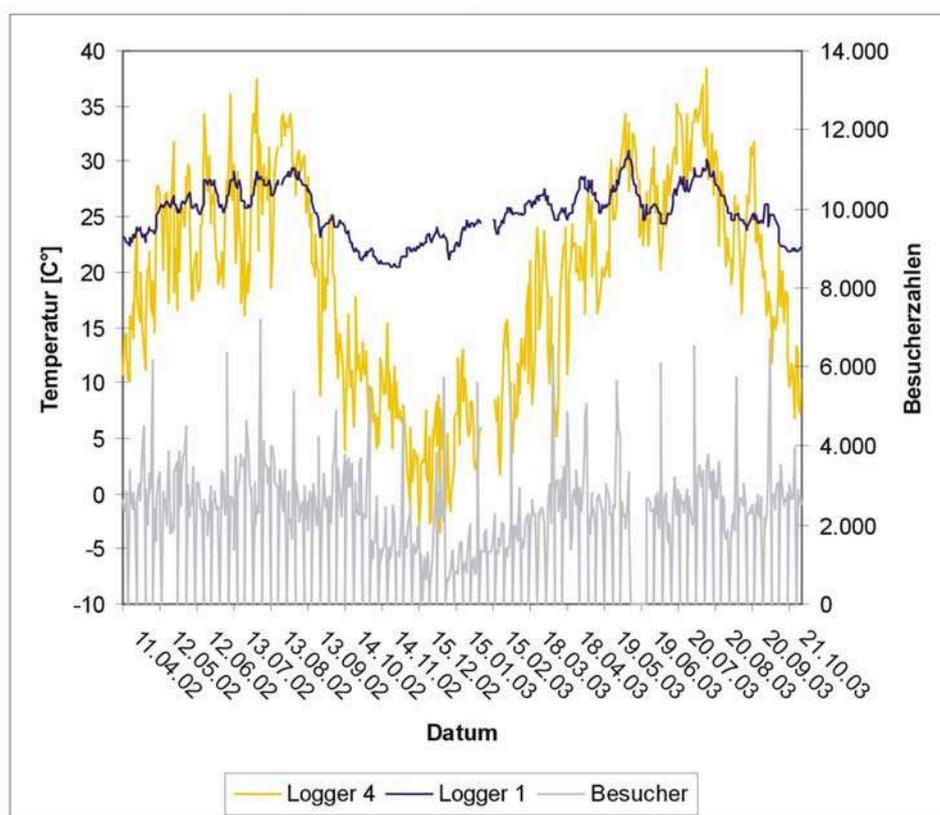
In der Zeit vom 11.04.2002 – 20.11.2003 wurden an verschiedenen Messstellen am Markttor mit Dataloggern die Temperaturen und die Luftfechtigkeiten gemessen. Neben den Thermo-Hygrometern direkt am Markttor wurde auch auf dem Dach des Museums ein Datalogger positioniert (Logger 4). Die genauen Positionen der einzelnen Thermo-Hygrometer sind der Abb. 9.1 zu entnehmen.



**Abb. 9.1:** Positionen der Thermo-Hygrometer am Markttor von Milet: Innenraum: Logger 1 (SN 201141, Logger 2 (SN 201147), Logger 3 (SN 201143), Logger 5+6 (no data); Dach: Logger 4 (SN 201142).

In dieser Arbeit werden lediglich die Daten der Datalogger eins (am Markttor, obere Etage) und vier (auf dem Dach des Museums) berücksichtigt. Die Daten der Datalogger eins und zwei zeigen dieselben Trendverläufe (ohne Darstellung). Die Temperaturen des Dataloggers eins liegen teilweise etwas höher, da die Wärme nach oben steigt. Die Luftfechtigkeiten sind dafür etwas niedriger als beim Datalogger zwei, da wärmere Luft weniger Feuchtigkeit aufnehmen kann.

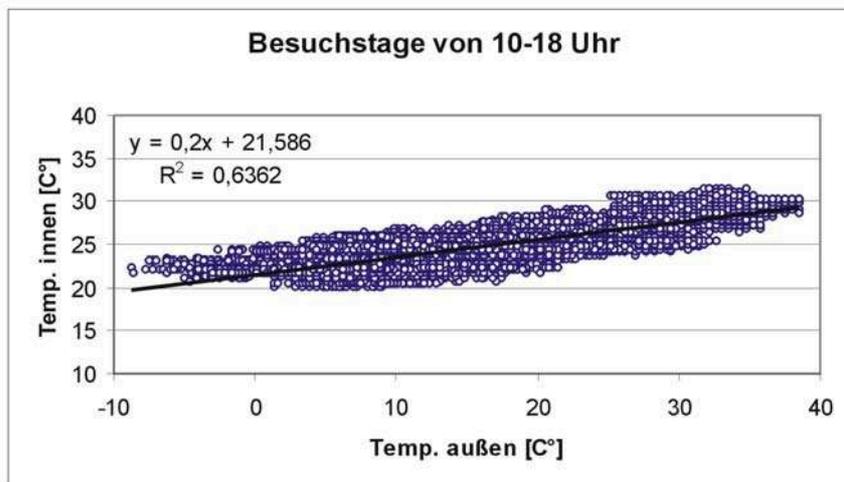
In der Abb. 9.2 wurden die Außen- (Logger 4) und Innentemperaturen (Logger 1), jeweils um 14 Uhr, sowie die Besucherzahlen in Abhängigkeit vom Datum aufgetragen.



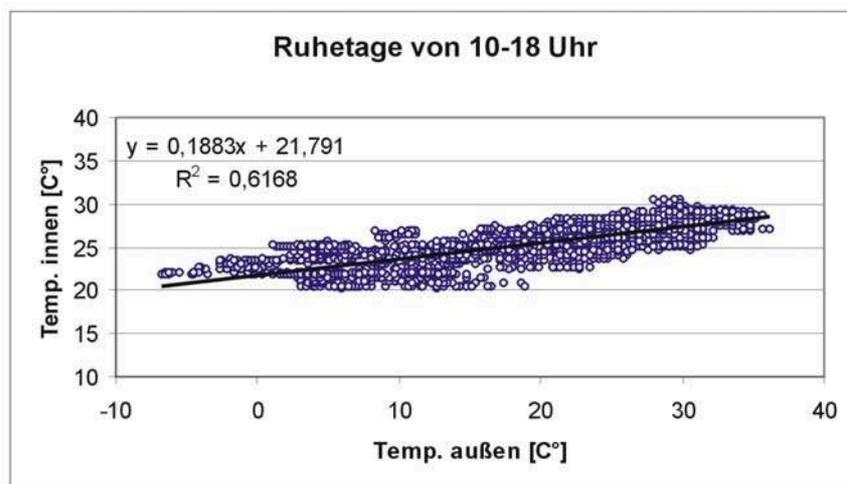
**Abb. 9.2:** Auftragung der Außen- (Logger 4) und Innentemperaturen (Logger 1) jeweils um 14 Uhr eines Tages und die Zahl der Besucher in Abhängigkeit von der Zeit.

Darin ist zu erkennen, dass die Innentemperatur des Museums hauptsächlich von der Außentemperatur abhängig ist. Teilweise reagiert die Innentemperatur etwas zeitverzögert (wenige Tage) zu der Außentemperatur. Die Besucher scheinen keinen oder wenig Einfluss auf die Temperatur im Museum zu haben. Um dieses genauer zu überprüfen wurden die Innentemperaturen gegen die Außentemperaturen von 10-18 Uhr (Öffnungszeit) jeweils für Besuchstage und Ruhetage (Montag) aufgetragen (s. Abb. 9.3 und 9.4). Gibt es einen Einfluss auf die Innentemperatur in Abhängigkeit von den

Besucher, so müsste die Innentemperatur bei einer definierten Außentemperatur an Besuchstagen größer sein als an den Ruhetagen.



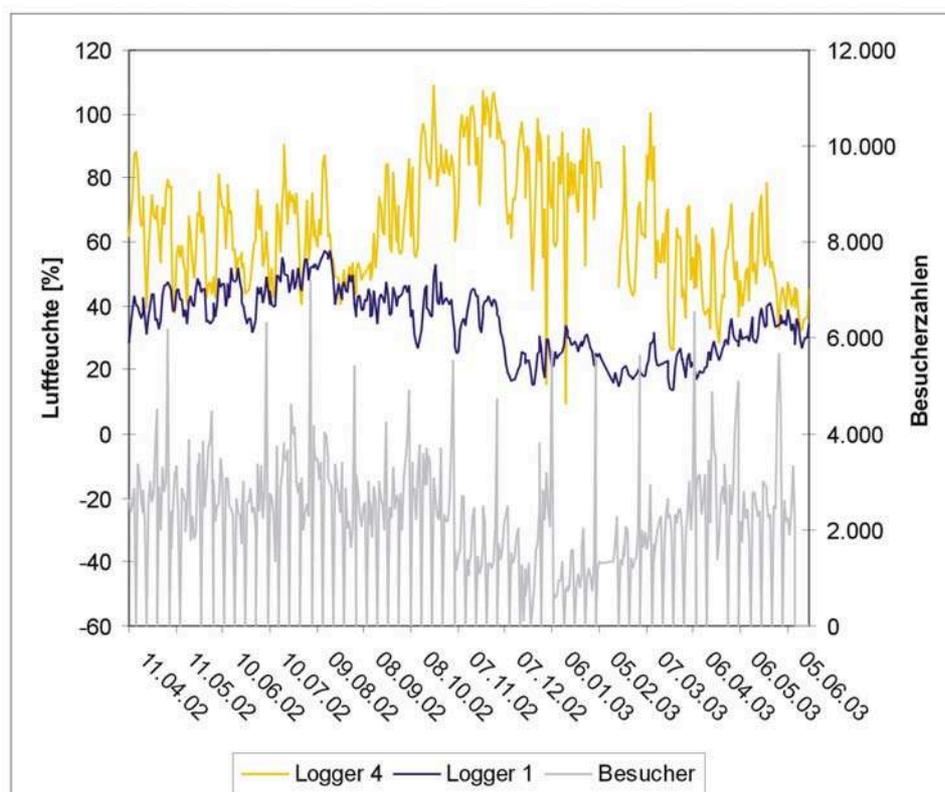
**Abb. 9.3:** Auftragung der Innentemperatur gegen die Außentemperatur von 10-18 Uhr an Besuchstagen.



**Abb. 9.4:** Auftragung der Innentemperatur gegen die Außentemperatur von 10-18 Uhr an Ruhetagen (Montag).

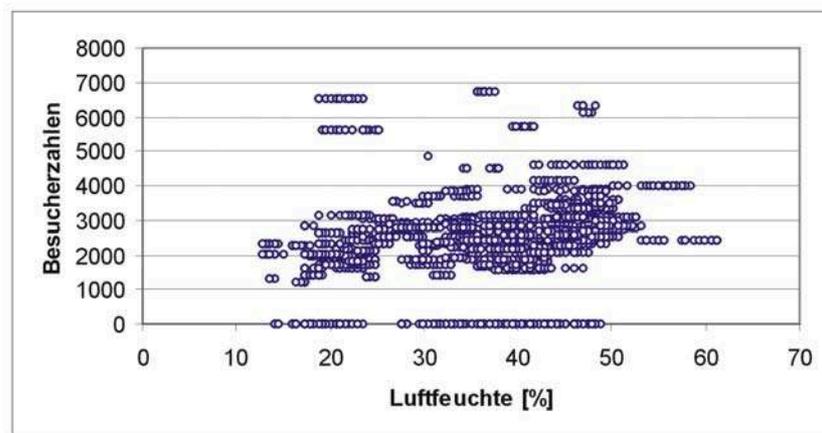
Vergleicht man nun die Innentemperaturen beider Diagramme z.B. bei einer Außentemperatur von 10 °C so liegt der Temperaturbereich in beiden Auftragungen bei 20-27 °C. Auch bei einer Außentemperatur von 30 °C sind bei beiden Diagrammen die Innentemperaturen relativ gleich. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass die Temperatur im Museum hauptsächlich von der Außentemperatur gesteuert wird, die Besucher haben keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Innentemperatur.

Als nächstes sollte überprüft werden, ob die Luftfeuchtigkeit im Museum im Zusammenhang mit den Besuchern steht. In der Abb. 9.5 wurden die innere Luftfeuchtigkeit, die Luftfeuchtigkeit auf dem Dach des Museums und die Besucherzahlen in Abhängigkeit von der Zeit aufgetragen. In diesem Diagramm ist kein Zusammenhang von vielen Besuchern und der Luftfeuchtigkeit im Museum zu erkennen. Vielmehr gibt die Kurve von Logger 1 die Luftfeuchtigkeiten außerhalb des Museums (Logger 4) in einem gepufferten Zustand wieder.



**Abb. 9.5:** Auftragung von Tagesmittelwerten der Luftfeuchtigkeiten im inneren des Museums (Logger 1) und auf dem Dach (Logger 4) und der Besucherzahlen in Abhängigkeit von der Zeit.

Da die Luftfeuchtigkeit von der Temperatur abhängig ist, wurde zur Überprüfung, ob viele Besucher zu einer höheren Luftfeuchtigkeit führen noch eine andere Darstellung gewählt (Abb. 9.6). In dieser wurden die Luftfeuchtigkeiten im Museum (Logger 1) in einem bestimmten Temperaturbereich von 1°C (25,1-26,1°C) gegen die Besucherzahlen aufgetragen. Gäbe es einen Zusammenhang beider Daten so müsste die Luftfeuchtigkeit im Museum mit höheren Besucherzahlen ansteigen. Betrachtet man nun die Abb. 2.6, so ist zu erkennen, dass auch bei Besucherzahlen über 6000 die Spannbreite der Luftfeuchtigkeit annähernd so groß ist wie an Ruhetagen (0 Besucher). Eine Abhängigkeit zwischen der Anzahl der Besucher und Schwankungen der Luftfeuchtigkeit ist somit nicht festzustellen..



**Abb. 9.6:** Auftragung der Luftfeuchte im Museum (Logger 1) bei einer Temperatur von 25,1-26,1 °C gegen die Anzahl der Besucher.

## 10. Zusammenfassung

Das Markttor von Milet wurde erstmals in den 20er Jahren des 20ten Jahrhunderts im Pergamonmuseum aufgebaut. Einige Säulen mussten dabei rekonstruiert werden. Durch einen Bombentreffer im zweiten Weltkrieg wurde der rechte Teil des Gebäudes stark beschädigt. In den Jahren 1952-1959 musste das Markttor aus diesem Grund abermals restauriert werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mineralogische und gefügekundliche Eigenschaften von Materialien des Markttors von Milet und eines Probestücks vom Pergamonaltar bestimmt. Zusätzlich wurden Ultraschalluntersuchungen an mit Mörtel gefüllten Marmorhohlzylindern durchgeführt um die Verträglichkeit zwischen diesen beiden Materialien zu überprüfen. Daneben wurde in der vorliegenden Arbeit die Klimasituation am Markttor im Pergamonmuseum in Abhängigkeit der Besucherzahlen diskutiert.

Um alle im Markttor von Milet verbauten Materialien zu erfassen wurden gezielt an verschiedenen Gebäudesituationen Bohrkerne entnommen. Die in diesen Bohrkernen vorkommenden Materialien sind Marmor, Deckschichten, Kalkmörtel, Zementmörtel, Beton und Ziegel.

Die Gefüge der beiden untersuchten Marmore weisen teilweise deutliche Unterschiede auf. Der Marmor aus Bohrkern I ist ein reiner Calcitmarmor mit einer bimodalen Korngrößenverteilung. Im inneren Teil des Marmors aus Bohrkern II ist das Korngefüge relativ gleichkörnig. Im äußeren Bereich des Marmors aus Bohrkern II gibt es eine Kornverkleinerung.

Die beprobten Deckschichten der beiden Aufbauphasen von 1920-1930 und 1952-1959 unterscheiden sich hauptsächlich von der Wahl der Zuschlagstoffe voneinander. In den Deckschichten aus dem Aufbau von 1920-1930 besteht der Zuschlag aus zumeist polygonal ausgebildeten Dolomitkörnern. Der Zuschlag aus den Deckschichten vom Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg besteht im Gegensatz dazu aus gerundeten Quarz- und Feldspatkörnern.

Die Kalkmörtel beider Aufbauphasen sind sich relativ ähnlich. Allerdings besitzt der Kalkmörtel aus der Aufbauphase um 1950 ein höheres Zuschlag zu Bindemittel-Verhältnis. Der Zuschlag besteht bei beiden Arten der Kalkmörtel aus Quarz und das Bindemittel aus Kalk.

Die untersuchten Zementmörtel wurden nur im Aufbau der 20er Jahre des vorigen Jahrhunderts verwendet. In dem Wiederaufbau nach dem zweiten Weltkrieg wurde Beton benutzt. Dieser unterscheidet sich hauptsächlich nur durch eine größere Korngröße im Zuschlag ( $> 4$  mm) von den Zementmörteln. In den Zementmörteln besteht der Zuschlag aus Quarz. Im hydraulischen Bindemittel wurden deutlich CSH-Phasen (Calciumsilikathydrate) und Klinkerreste nachgewiesen.

Die untersuchten Ziegel unterscheiden sich hauptsächlich in der Farbe. Diese variiert von gelblich bis orange. In den Ziegeln sind zumeist eckige Quarzkörner in einer feinkörnigen Matrix.

Eine detaillierte Zusammenfassung der gefügekundlichen Eigenschaften und mineralogischen Zusammensetzung der Geomaterialien des Markttors wurde in Kapitel 6 beschrieben.

Die durchgeführte Anionenuntersuchung auf auslaugbare Sulfat-, Chlorid- und Nitrat-Gehalte mit Hilfe der Ionenchromatographie zeigt nur bei einem Bohrkern (Bohrkern IV) bei Mobilisierung dieser Anionen ein Salzbildungspotential an der Oberfläche der Säule bzw. des Sockels.

Zu den mechanisch-physikalischen Untersuchungsmethoden gehört die Porenradienverteilung, Bestimmung der Druckfestigkeit und des dynamischen E-Moduls.

Die Porenradieverteilung wurde für fast alle aus dem Markttor entnommenen Materialien bestimmt. Sie zeigt für die meisten Proben ein Porengrößenmaximum im Bereich der Kapillarporen (30 -10.000 nm). Die Gesamtporosität liegt für die untersuchte Deckschicht und untersuchten Zementmörtel relativ niedrig bei ca. 15 %. Die untersuchten Ziegel besitzen eine relativ hohe Porosität von zum Teil deutlich über 40 %. Die Gesamtporositäten der analysierten Kalkmörtel variieren sehr stark und liegen zwischen den Werten der untersuchten Deckschicht und den Ziegeln.

Die Druckfestigkeit und der dynamische E-Modul wurden lediglich für drei Proben bestimmt. Dabei konnten die beiden untersuchten Ziegel der Bohrkern II und III in die Druckfestigkeitsklasse 12, bzw. 8 (nach DIN 105) eingeteilt werden. Der Zementmörtel aus Bohrkern V konnte der Mörtelgruppe III (nach DIN 1053) zugeordnet werden.

Die Ultraschalluntersuchung an mit Mörtel gefüllten Marmorhohlzylindern wurde durchgeführt um die Verträglichkeit zwischen Marmor und ausgesuchten Ersatzmörteln zu testen. Die makroskopische Beobachtung zeigte kurze Zeit nach Einfüllen des Mörtels in die Marmorhohlzylinder eine deutliche Gelbfärbung der Marmore. Diese verschwindet mit

zunehmender Trocknung der Zylinder. Eine schnelle Abbindung des Mörtels führt zu einer Rissbildung zwischen der Kontaktfläche Mörtel-Marmor. Die Ultraschalluntersuchung wurde in verschiedenen Erhaltungszuständen der Zylinder durchgeführt. Im unbeanspruchten mörtelbefüllten Marmorzylindern der Probe 32 (Probe 68) liegen die Ultraschallgeschwindigkeiten bei ca. 4 km/s (3 km/s). Durch eine thermische Beanspruchung der Zylinder werden die Kompressionswellengeschwindigkeiten um ca. 1,5 km/s stark herabgesenkt. Die konservierten Proben besitzen höhere Vp-Eigenschaften von knapp 5 km/s. Eine erneute thermische Beanspruchung führt bei dem Marmor zu einer Geschwindigkeitsreduktion von ca. 1 km/s. Die Ultraschallgeschwindigkeiten der Mörtel ändern sich durch die thermische Beanspruchung kaum. Die Ultraschallgeschwindigkeiten des groben Calcitmarmors sind generell etwas langsamer als die in dem feinkörnigerem Marmor. Fazit dieser Untersuchung ist, dass bei thermischer Belastung, d.h. Verwitterung der Säulen, Marmor und Mörtel unterschiedliche Verhalten zeigen. Marmore reagieren sehr sensibel auf Temperaturereignisse (unbehandelt sowie auch konserviert), wobei Mörtel davon fast nicht betroffen sind.

Eine Untersuchung der Klimasituation im Museum hat ergeben, dass weder die Temperatur noch die Luftfeuchtigkeit im Museum von den Besucherzahlen abhängig ist. Vielmehr werden beide Parameter durch das Außenklima gesteuert und geben dieses teilweise mit einer Zeitverzögerung in einem gepufferten Zustand wieder. Hierbei könnte die Besucherzahl durch häufiges Öffnen der Türen einen geringen, jedoch nicht nachweisbaren Einfluss besitzen.

Die in der vorliegenden Arbeit ermittelten Daten geben eine Erkenntnis-Erweiterung der im Markttor von Milet verbauten Geomaterialien wieder. Die untersuchten Materialien zeigen eine hohe Variabilität. Die mineralogische Zusammensetzung, gefügekundliche und petrophysikalische Eigenschaften der jeweiligen Materialien sollten bei einer Sanierung des Markttors Berücksichtigung finden.

## 11. Literaturverzeichnis

AURAS, M., SIEDEL, H. & WEBER H. (1997): Reinigung und Steinkonservierung. In: KIESEWETTER, A. & KIESOW, G. (Hrsg.): Naturwerkstein und Umweltschutz in der Denkmalpflege: 683-716.

BLUM, R. (1993): Über moderne physikalische Methoden der Diagnose an historischen Bau- und Kunstdenkmälern. Materialien zur Fort- und Weiterbildung 1: Bestandserfassung und Bestandsanalyse an Kulturdenkmalen; Niedersächsisches Landesverwaltungsamt, Institut für Denkmalpflege Hannover, 106-119.

BLUMENAUER, H. (1989): Werkstoffprüfung. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

DANDEKAR, D.P. (1968): Variation in the elastic constants of calcite with pressure AGU Transactions. 49 (1): 323.

DIN 105: Druckfestigkeitsklassen für Ziegel, Beuth, Berlin.

DIN 1053: Festigkeitsanforderungen für Mörtel. Beuth, Berlin

DIN 38 414 Teil 4: Deutsche Einheitsverfahren zur Wasser-, Abwasser- und Schlammuntersuchung, Schlamm und Sedimente (Gruppe S), Bestimmung der Eluierbarkeit mit Wasser (S 4). Beuth, Berlin

DIN/ISO 8047: Festbeton; Bestimmung der Ultraschall-Ausbreitgeschwindigkeit. Beuth, Berlin

DÜLLMANN, H. (1976): Die Ermittlung der elastischen Kennwerte von Gesteinen mittels Ultraschall-Laufzeitmessungen und einaxialer Druckversuche unter besonderer Berücksichtigung einer durch das Korngefüge bedingten mechanischen Anisotropie. Mitteilung der Ingenieur- und Hydrogeologie 1, 244 S.

DÜRRAST, H., SIEGESMUND, S. & PRASAD, M. (1999): Die Schadensanalyse von Naturwerksteinen mittels Ultraschalldiagnostik: Möglichkeiten und Grenzen. z. dt. geol. Ges., 150: 359-374; Stuttgart.

EN 10 504-1 (alt: DIN 1048 Teil 2): Prüfung von Beton in Bauwerken, Teil 1 Bohrkernproben. Beuth, Berlin.

HAHN-WEINHEIMER, P., HIRNER, A. & WEBER-DIEFENBACH, K. (1984): Grundlagen und praktische Anwendung der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA). – Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Wiesbaden..

JOHNSON, G.C. & WENK, H.R. (1985): Calculation of elastic anisotropy in textured marbles. In: AGU 1985 fall meeting. Eos, Transactions, American Geophysical Union. 66; 46, 1039-1085.

KÄSTNER, V. & WEISE, S. (1992): Das Markttor von Milet. Staatliche Museen zu Berlin-Preußischer Kulturbesitz, (Führungsblatt - Nr. ANT.3).

KÖHLER, W. (1991): Untersuchungen zu Verwitterungsvorgängen an Carrara-Marmor in Potsdam-Sanssouci. - Berichte zu Forschung und Praxis der Denkmalpflege in Deutschland. Steinschäden – Steinkonservierung 2: 50-53; Hannover.

KRAUKRÄMER, J. & KRAUTKRÄMER, H. (1986): Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg.

LORENZ, H.G. & IBACH, H.W. (1999): Marble conservation by Ibach-Total-Imbregnation Process: Quality control and optimisation by microscopic and petrophysical data. Z. dt. geol. Ges., 150: 375-386.

MAACK, V. (2003): Entwicklung kompatibler Vergussmörtel zur Instandsetzung der Säulen des Markttors von Milet im Berliner Pergamon Museum. Dipl.Arbeit, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens, Universität Kassel.

REIMER, L. und PFEFFERKORN, G., (1977): Raster-Elektronenmikroskopie. - 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin – Heidelberg.

ROTHERT, E.M. (2002): Gesteintechnische Eigenschaften ausgebaute Marmore des Markttors von Milet. Bachelor Arbeit; Göttinger Zentrum Geowissenschaften, Universität Göttingen.

RÜDRICH, J.M. (2003): Gefügekontrollierte Verwitterung natürlicher und konservierter Marmore. Diss., Göttinger Zentrum Geowissenschaften, Universität Göttingen.

SCHMIDT, P.F. und 13 Mitautoren (1994): Praxis der Rasterelektronenmikroskopie und Mikrobereichsanalyse. - expert Verlag, Renningen – Malsheim.

SCHWEDT, G. (1994): Chromatographische Trennmethode. - 3. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart.

SCHWEDT, G. (1995): Taschenatlas der Analytik. - 2. Auflage, Thieme Verlag, Stuttgart.

STARK, J. UND WICHT, B. (2000): Zement und Kalk: der Baustoff als Werkstoff. Birkhäuser Verlag, Basel (Schweiz), 376 S.

WASHBURN (1921): The dynamics of capillary flow. The physical review; Second series, 17(1921): 273-283.

WEISS, T., RASOLOFOSON, P.N.J. & SIEGESMUND, S. (2001): Thermal microcracking in Carrara marble. Z. dt. geol. Ges., 152/2-4: 621-636.

WIHR, R. (1995): Fünfzehn Jahre Acrylharzvolltränkung in Bayern. Arbeitsblätter Stein, 9: 32-40.

ZESSA, U. (1990): Physical-mechanical properties of quarry and building stones. Advanced Workshop „Analytical Methodologies for the Investigation of Damaged Stones“, Pavia 14.-21.9.1990, 21 S.



# ANHANG II: Prüfzeugnis der Druckfestigkeitsbestimmung

## AMPA Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen Universität Kassel Prüfzeugnis

Prüfung nach DIN 1048 Teil 2 hier : Bohrkerndruckfestigkeit

Prüfberichtsnummer : xxx phys. 2003

### Angaben des Antragstellers

Auftraggeber : Werkstoffe des Bauwesens H. Middendorf  
Bauvorhaben : Tor von Milot  
Bauteil : --  
Bemerkungen : ohne  
Herstellungsdatum : ??  
Festigkeitsklasse : B ??  
zu prüfen nach : -- Tage  
LieferscheinNr. : ohne  
Sorte/Rez.Nr. : ohne

### Angaben der Materialprüfanstalt

Eingang der Probe : 01.07.2003  
Prüfdatum : 4.7.2003  
Prüfalter : ?? Tage  
Säge- u. Abgleichzeit : 0,45 Std.  
Bemerkungen : Proben abgeglichen  
Prüfer : DEISS

	Durchmesser (mm)	Höhe (mm)	Gewicht (kg)	Rohdichte (kg/dm <sup>3</sup> )	Prüf- fläche (mm <sup>2</sup> )	Bruch- last (kN)	Druck- festigkeit (N/mm <sup>2</sup> )
BK 2/3	30,5	32,4	0,034	1,425	732	9,465	12,9
BK 3c	30,5	28,7	0,032	1,512	730	7,212	9,9
BK 5/1	30,5	33,9	0,052	2,081	731	20,731	28,4
Mittelwert	30,5	31,7	0,039	1,673	731	12,469	17,1

Kassel, den 4.7.2003

Leiter der AMPA : \_\_\_\_\_

( Prüfsiegel )

# ANHANG III: Ultraschallgeschwindigkeitsmessungen an mörtelgefüllten Marmorhohlzylindern

an

**Marmor 32, langsame Abbildung**

	parallel x- Richtung [km/s]	parallel z- Richtung [km/s]	parallel y- Richtung [km/s]	Mörtel [km/s]
<b>Ausgangs-material</b>	4,00	3,75	4,39	3,91
	2,45	2,43		
	4,68	4,84	5,90	4,60
<b>Acrylharz</b>				
<b>Volltränkung</b>	4,50	4,73	5,22	4,25
	3,49	3,34	3,98	4,37
<b>thermische</b>				
<b>Beanspruchung</b>	3,34	3,23	4,39	4,46
	4,60	4,19		
<b>Marmordaten</b>	3,61	4,03		

**Marmor 32, schnelle Abbildung**

	parallel x- Richtung [km/s]	parallel z- Richtung [km/s]	parallel y- Richtung [km/s]	Mörtel [km/s]
<b>Ausgangs-material</b>	4,01	3,87	4,62	4,05
	2,36	2,40		
	4,84	4,64	5,75	4,69
<b>Acrylharz</b>				
<b>Volltränkung</b>	4,55	4,61	5,58	4,63
	3,42	3,41	3,84	4,60
<b>thermische</b>				
<b>Beanspruchung</b>	3,32	4,006	3,91	4,55
	4,60	4,19		
<b>Marmordaten</b>	3,61	4,03		

**Marmor 68, langsame Abbildung**

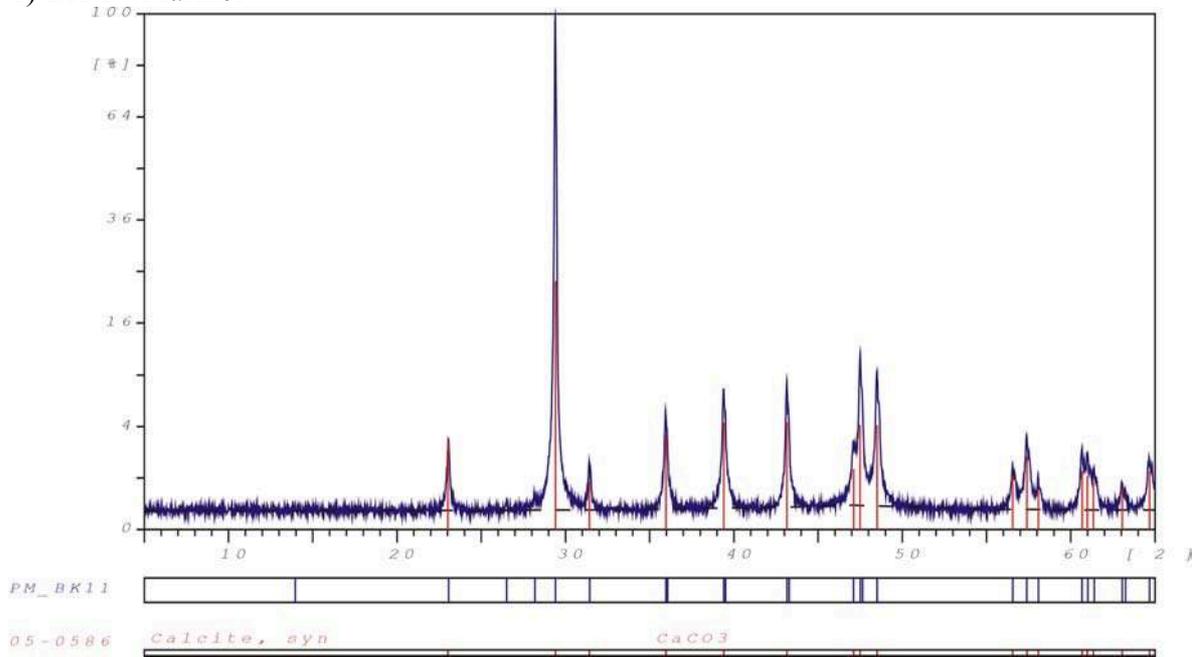
	parallel x- Richtung [km/s]	parallel z- Richtung [km/s]	parallel y- Richtung [km/s]	Mörtel [km/s]
<b>Ausgangs-material</b>	3,41	3,22	3,07	4,10
		2,36	2,13	
	5,05	4,49	4,45	4,46
<b>Acrylharz</b>				
<b>Volltränkung</b>	5,24	4,45	4,34	4,46
	3,28	2,91	3,01	4,35
<b>thermische</b>				
<b>Beanspruchung</b>		2,97	3,01	
		5,097	4,505	
<b>Marmordaten</b>		2,79	2,47	

**Marmor 68, schnelle Abbildung**

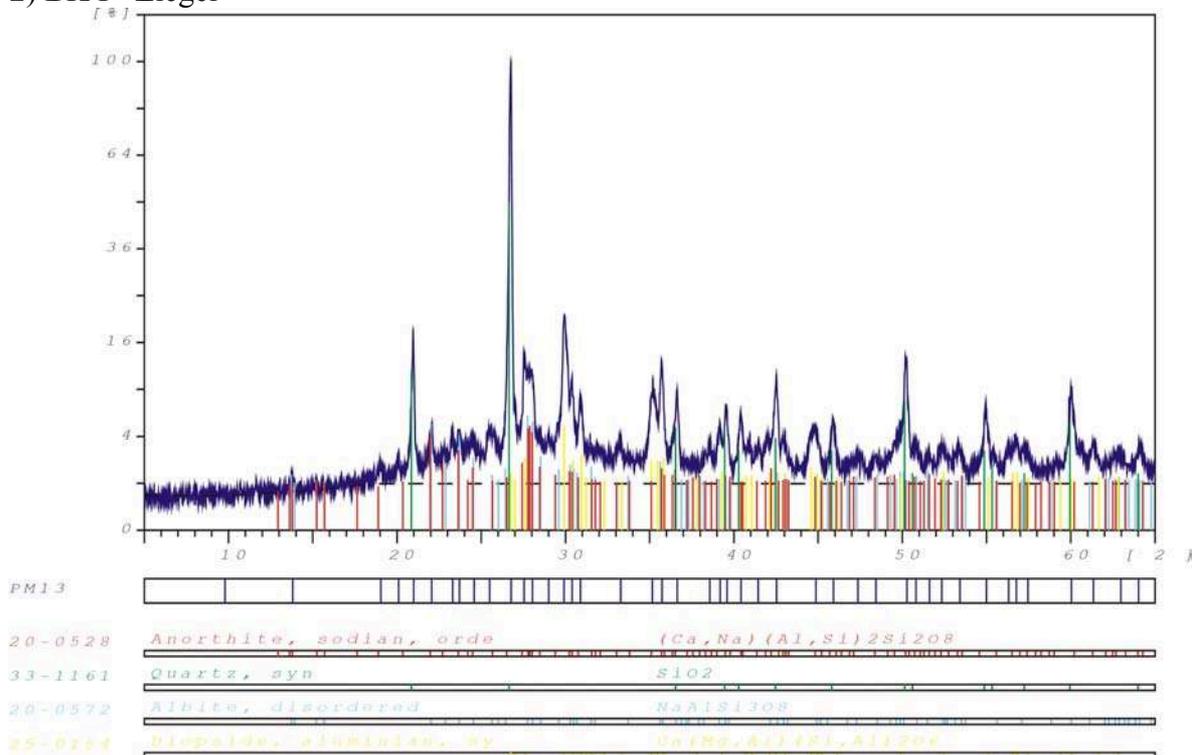
	parallel x- Richtung [km/s]	parallel z- Richtung [km/s]	parallel y- Richtung [km/s]	Mörtel [km/s]
<b>Ausgangs-material</b>	3,09	2,90	3,12	4,02
		1,78	1,61	
	5,13	4,45	4,24	4,75
<b>Acrylharz</b>				
<b>Volltränkung</b>	5,06	4,37	4,34	4,78
	3,46	3,15	3,12	4,53
<b>thermische</b>				
<b>Beanspruchung</b>	3,59	2,85	2,89	4,87
		5,097	4,505	
<b>Marmordaten</b>		2,79	2,47	

# ANHANG IV: Röntgendiffraktometeraufnahmen der verschiedenen Geomaterialien im Markttor von Milet und des Probenstücks des Pergamonaltars

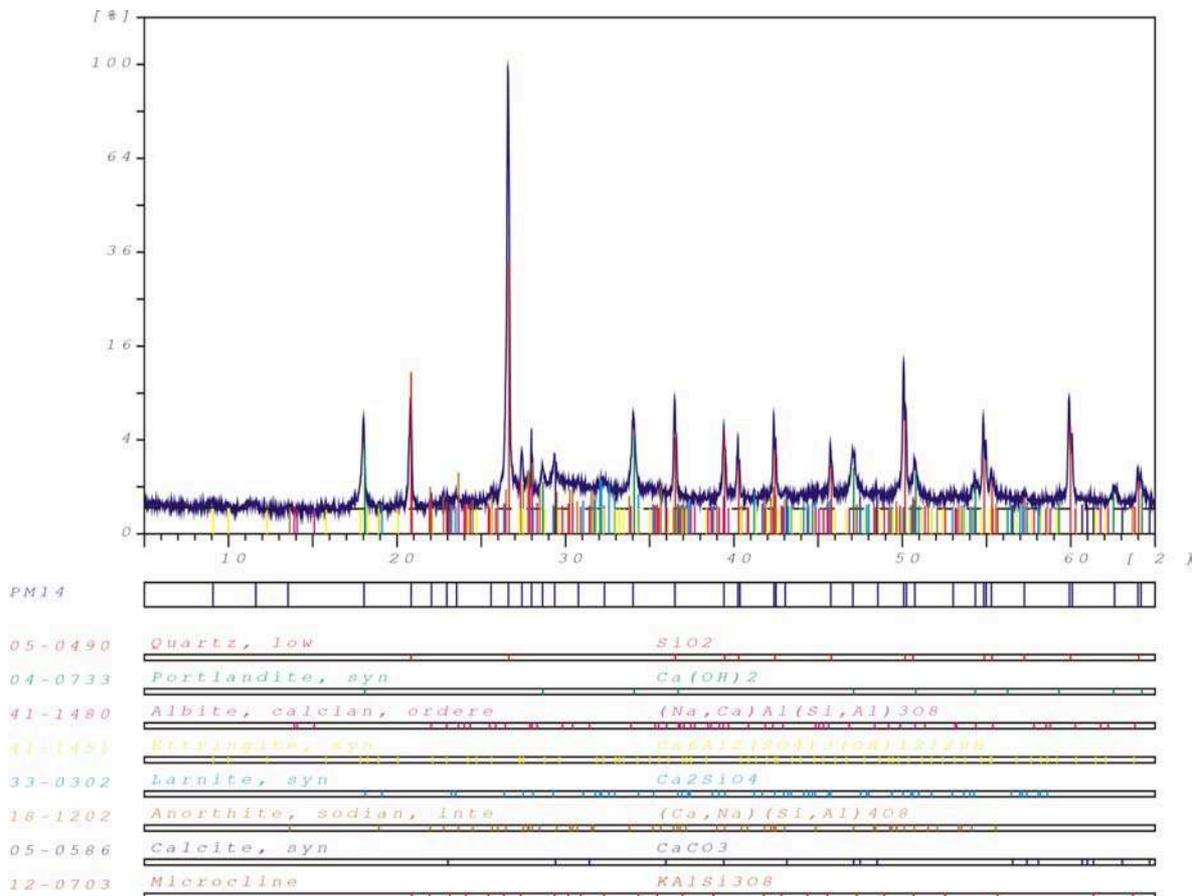
## 1) BK 1 - Marmor



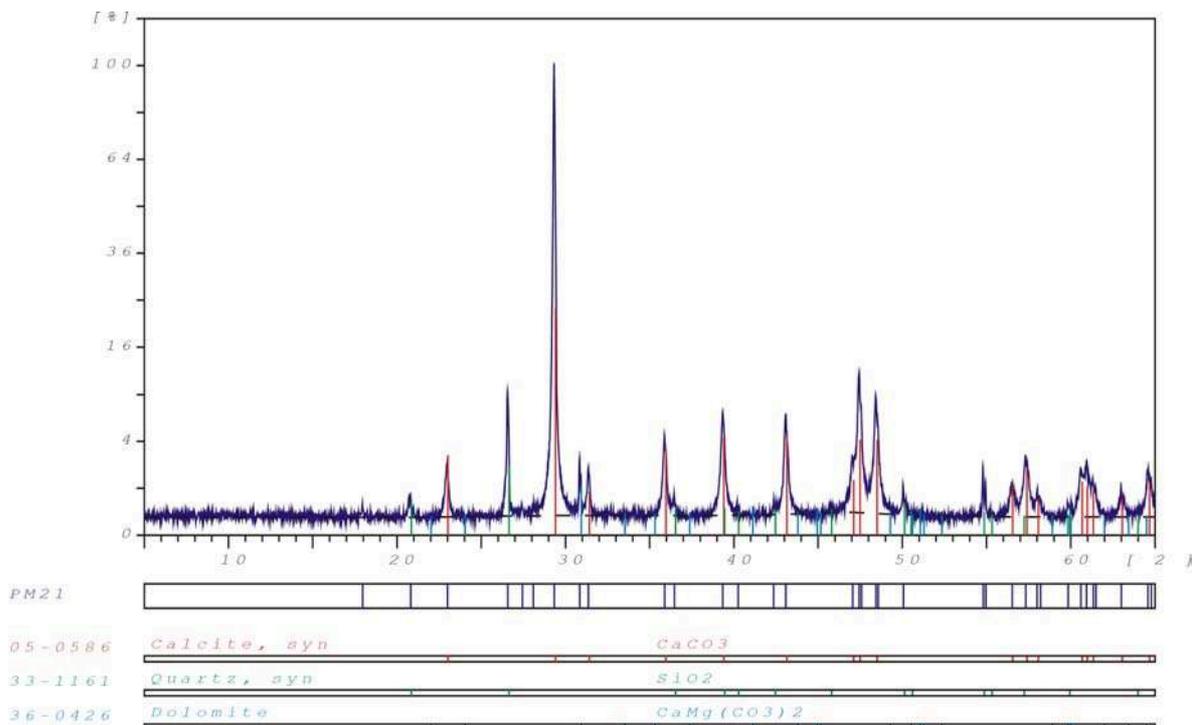
## 2) BK I - Ziegel



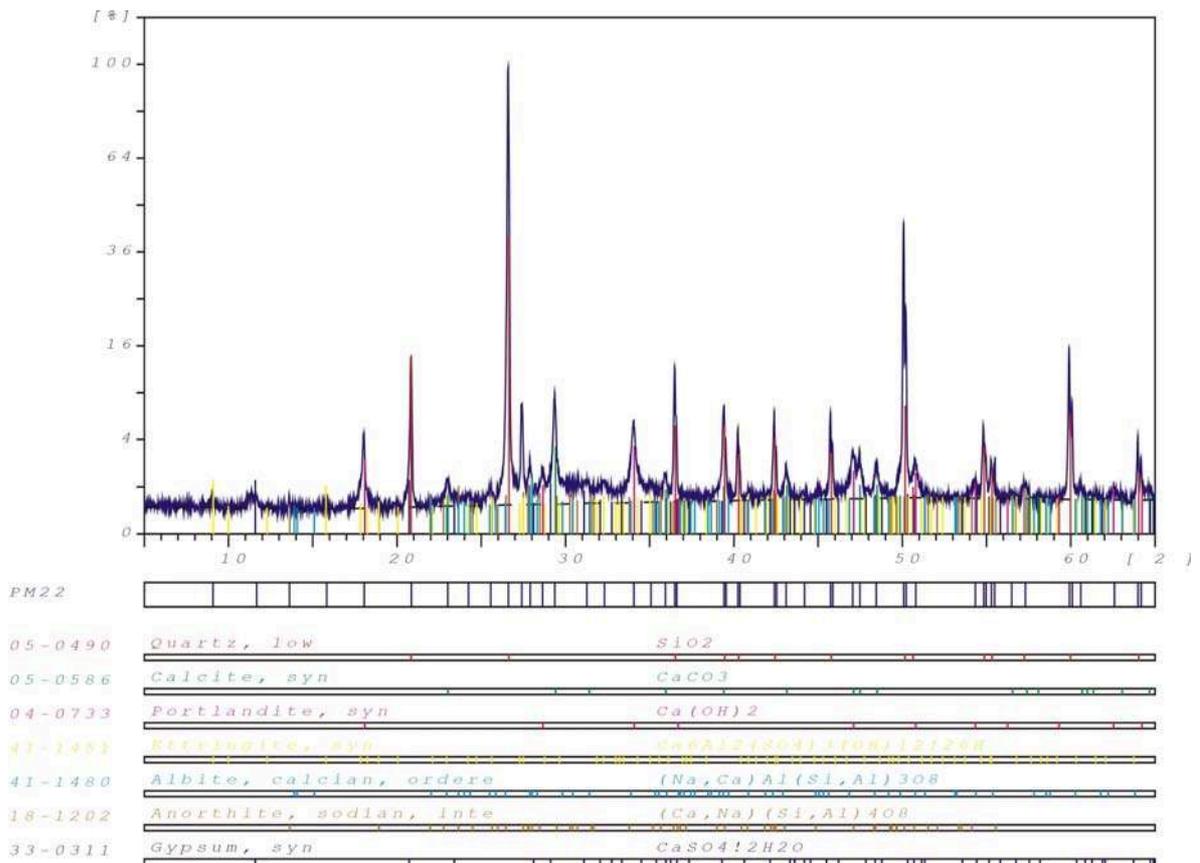
### 3) BK I - Zementmörtel



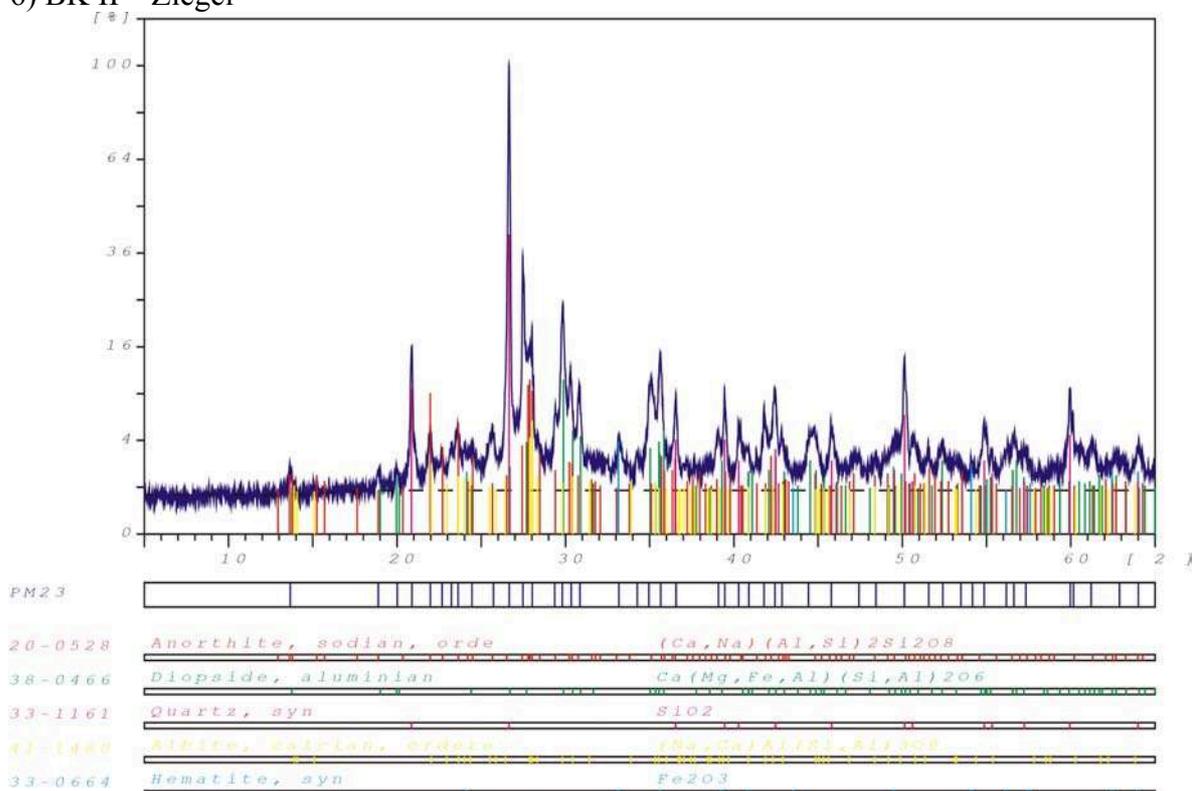
### 4) BK II - Marmor



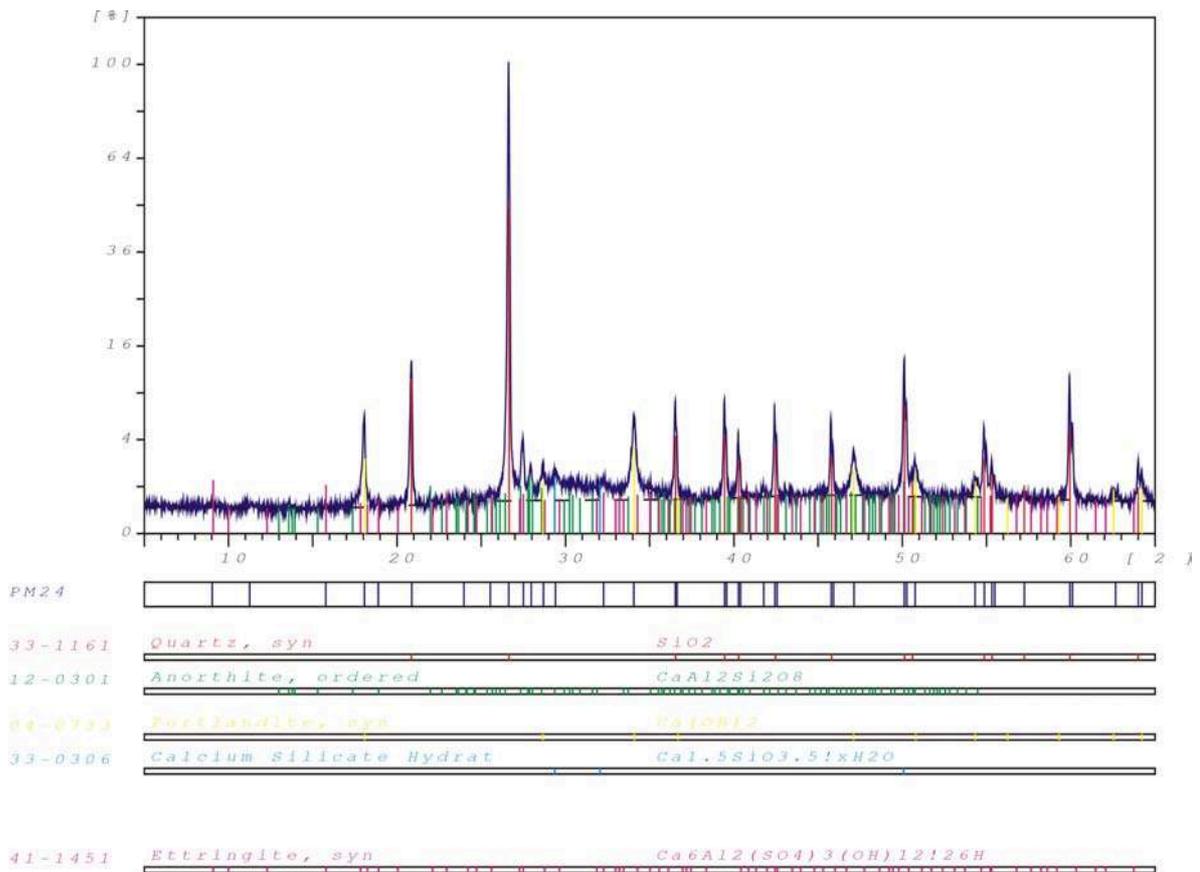
## 5) BK II - Kalkmörtel



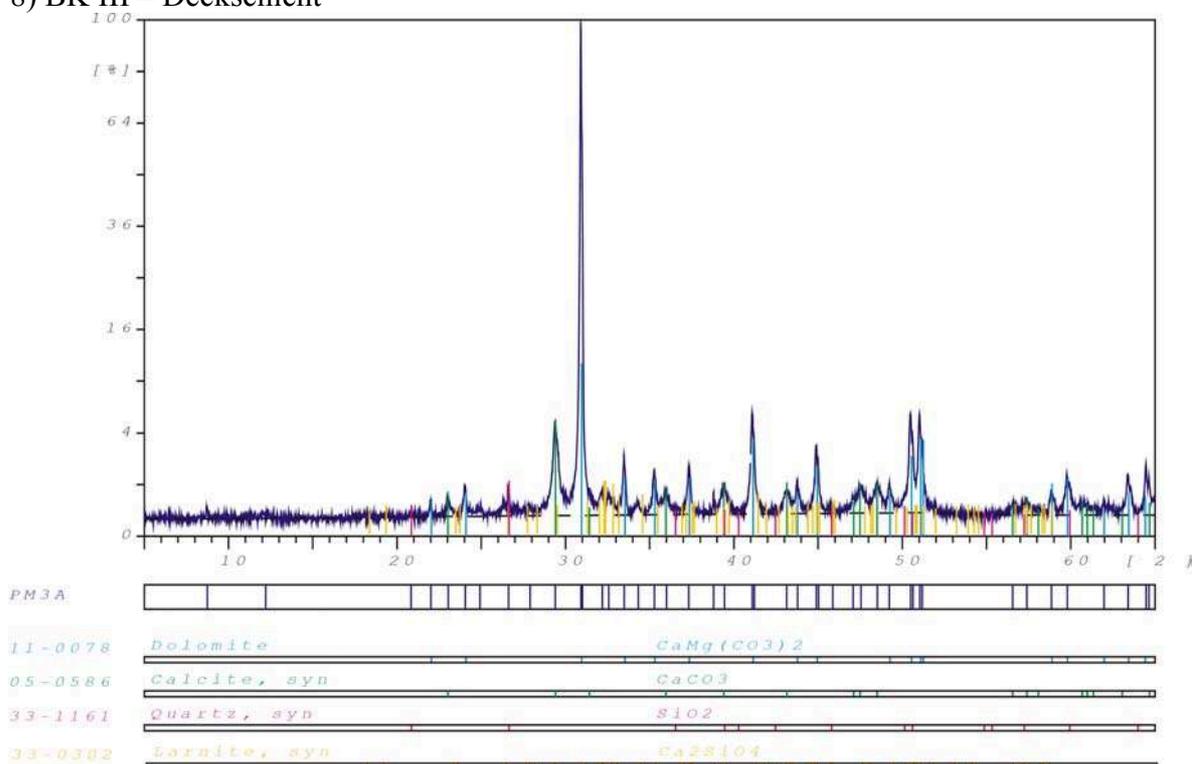
## 6) BK II - Ziegel



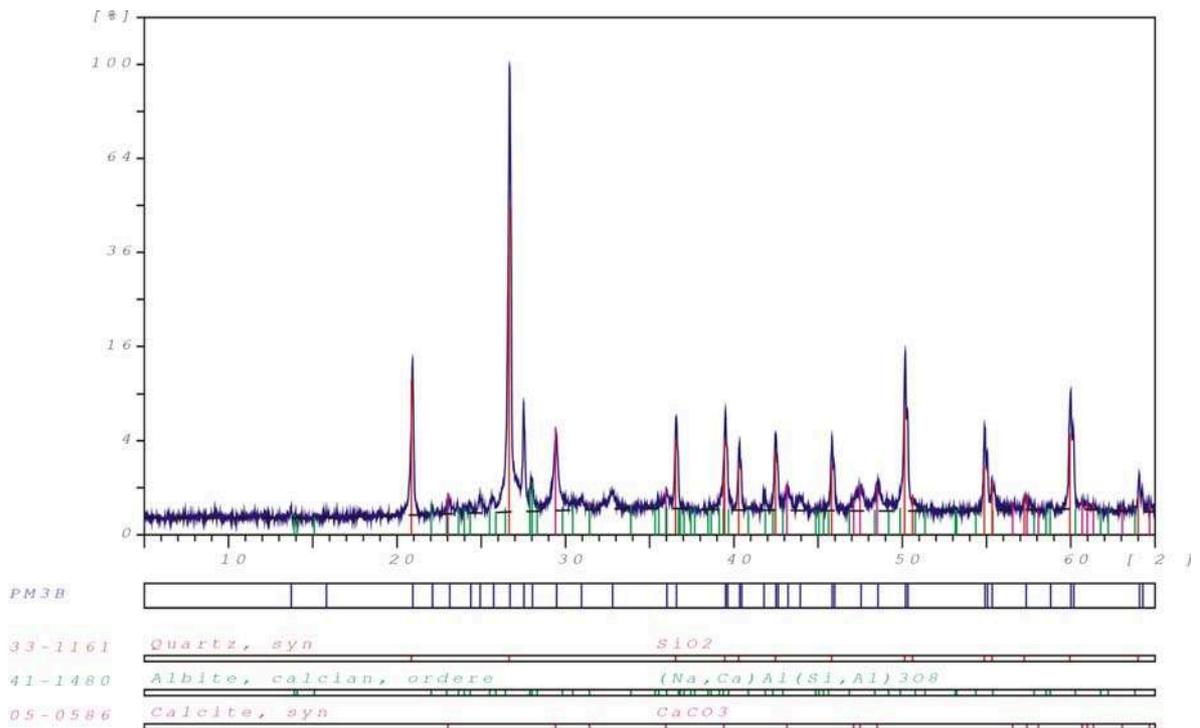
## 7) BK II – Zementmörtel



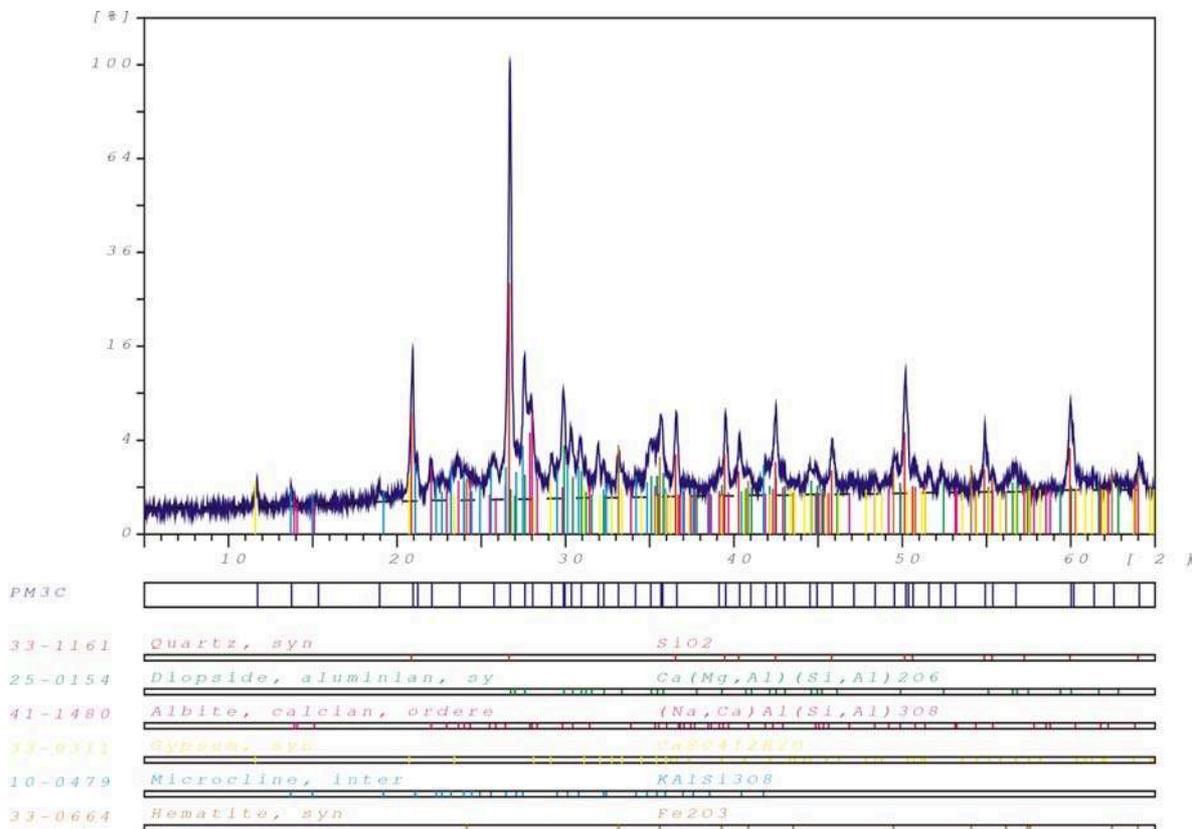
## 8) BK III – Deckschicht



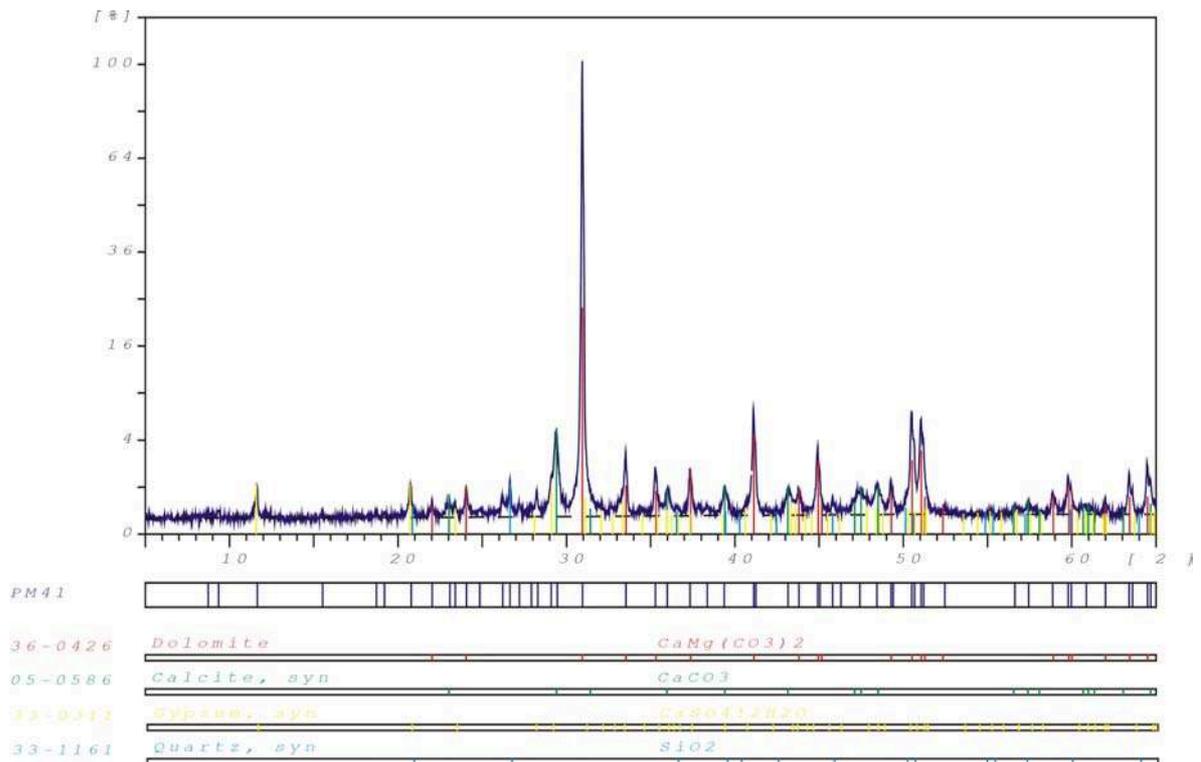
### 9) BK III – Kalkmörtel



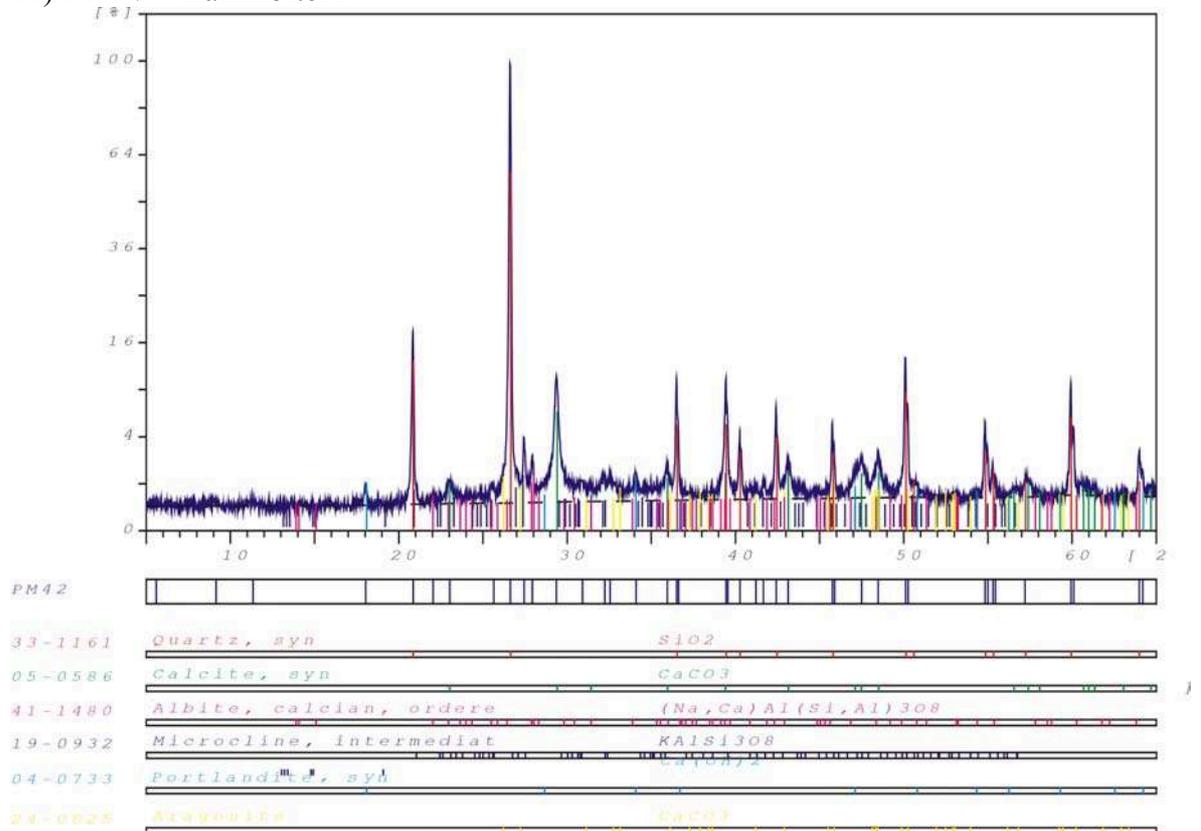
### 10) BK III – Ziegel



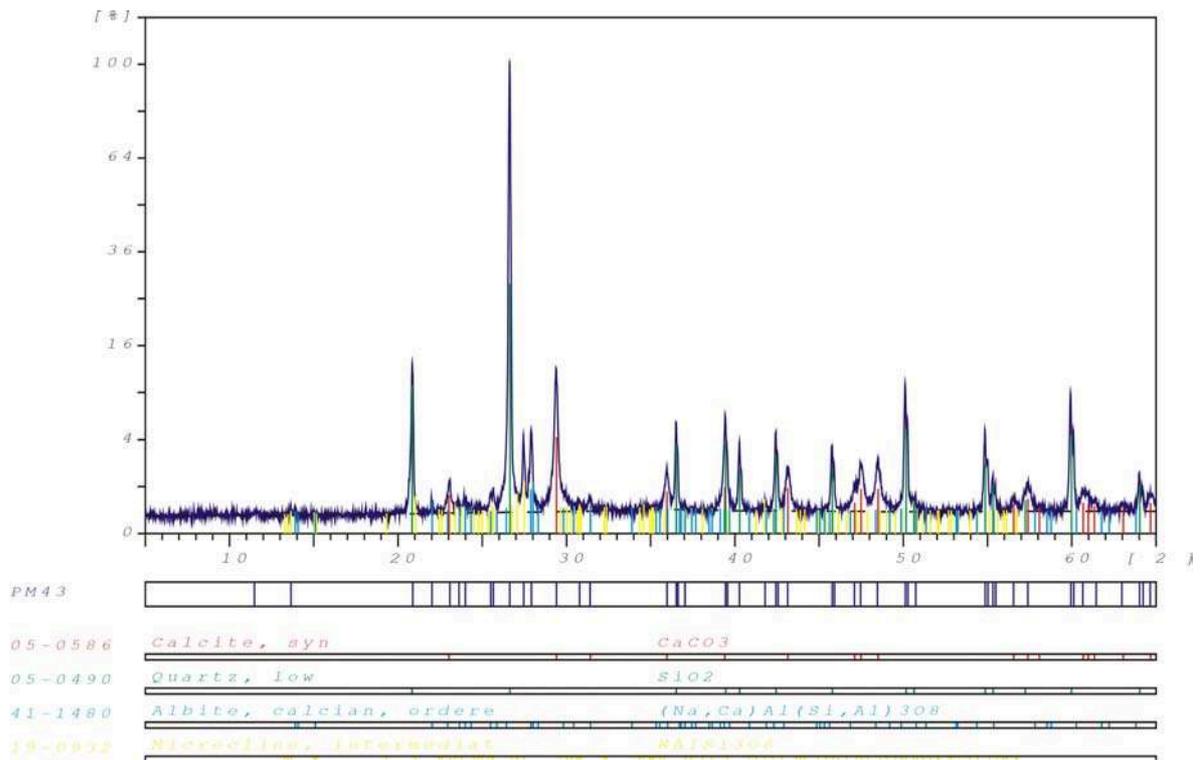
## 11) BK IV – Deckschicht



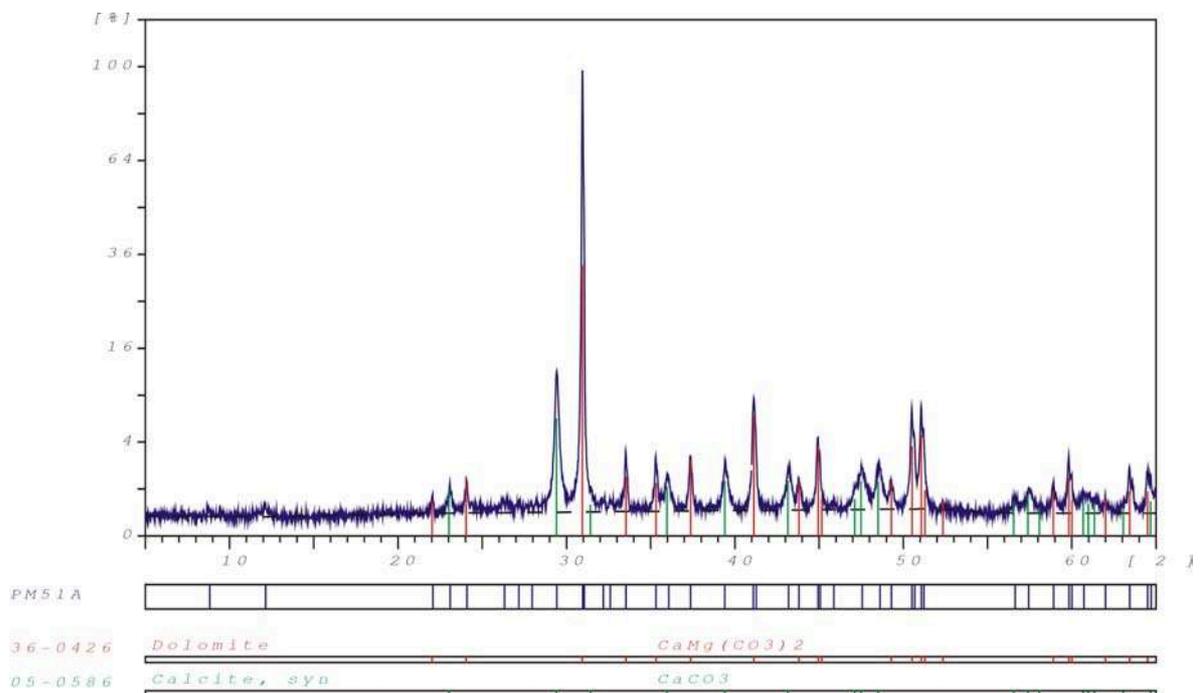
## 12) BK IV – Kalkmörtel 1



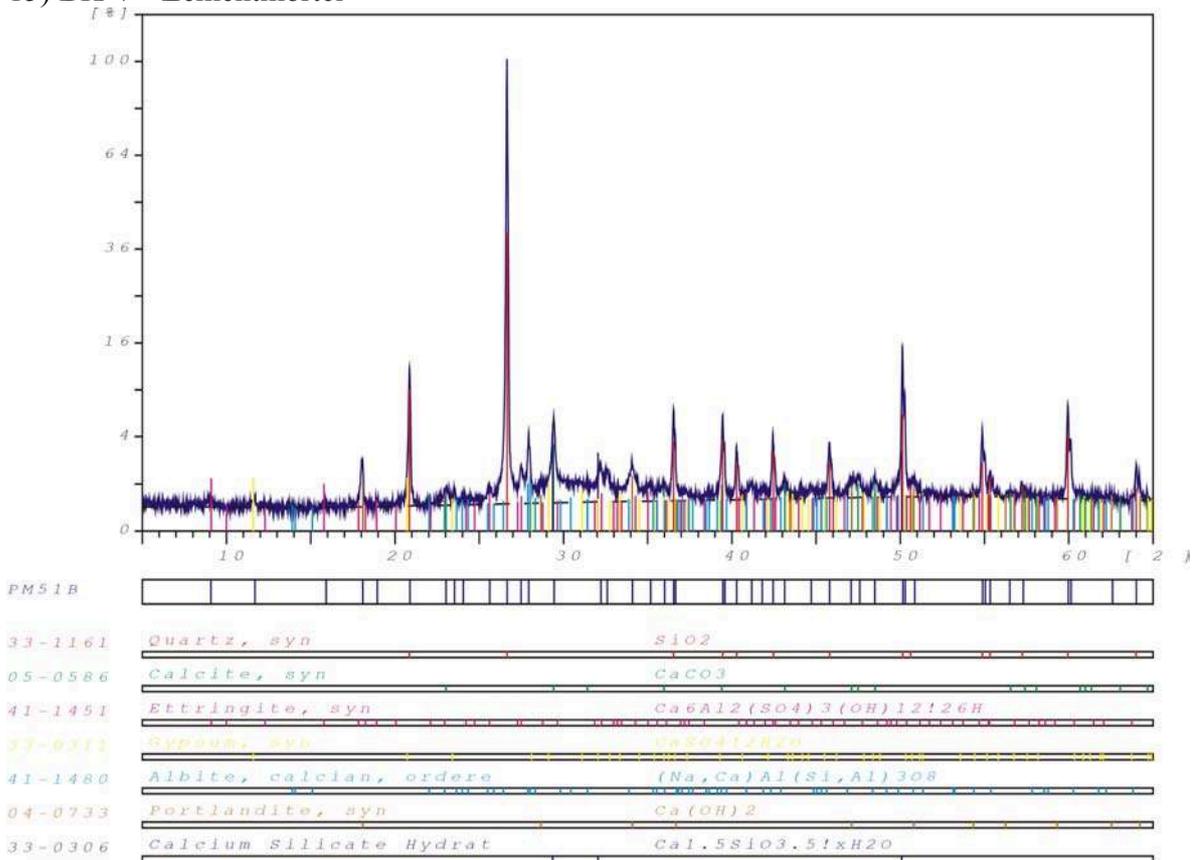
### 13) BK IV – Kalkmörtel 2



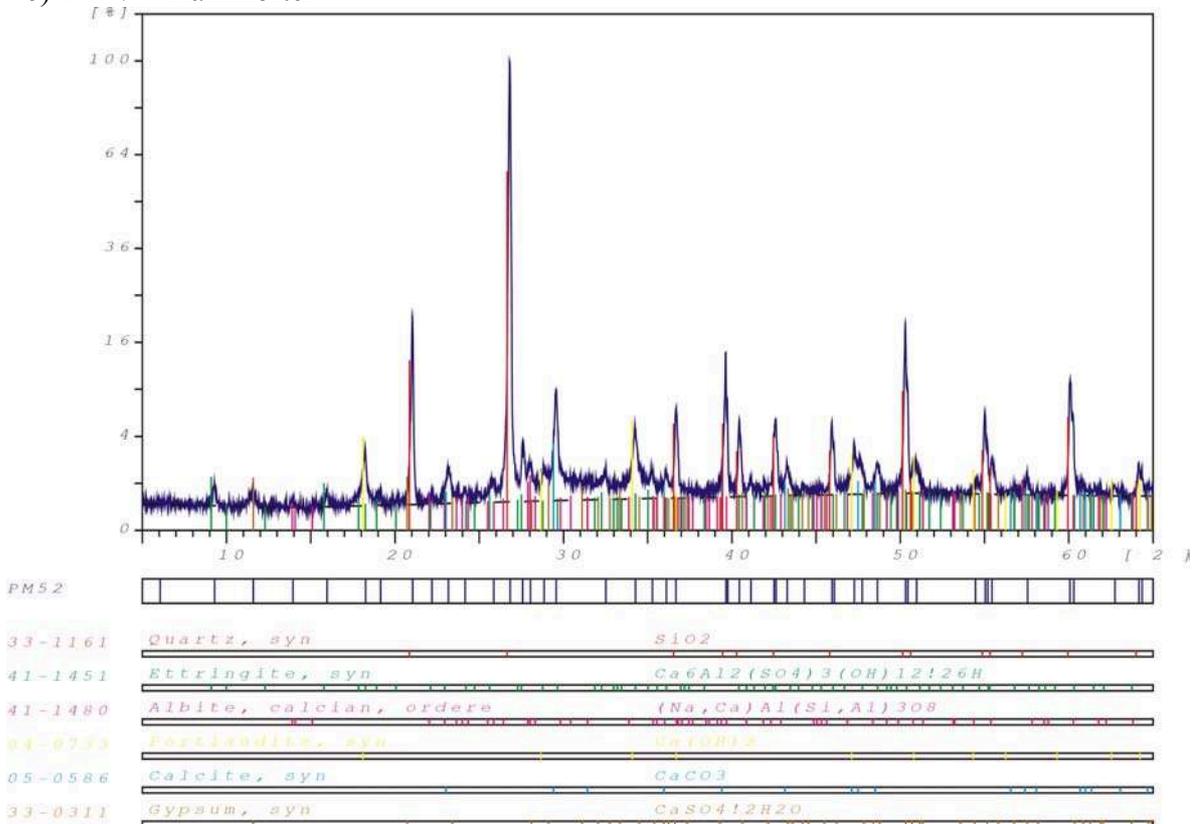
### 14) BK V – Deckschicht



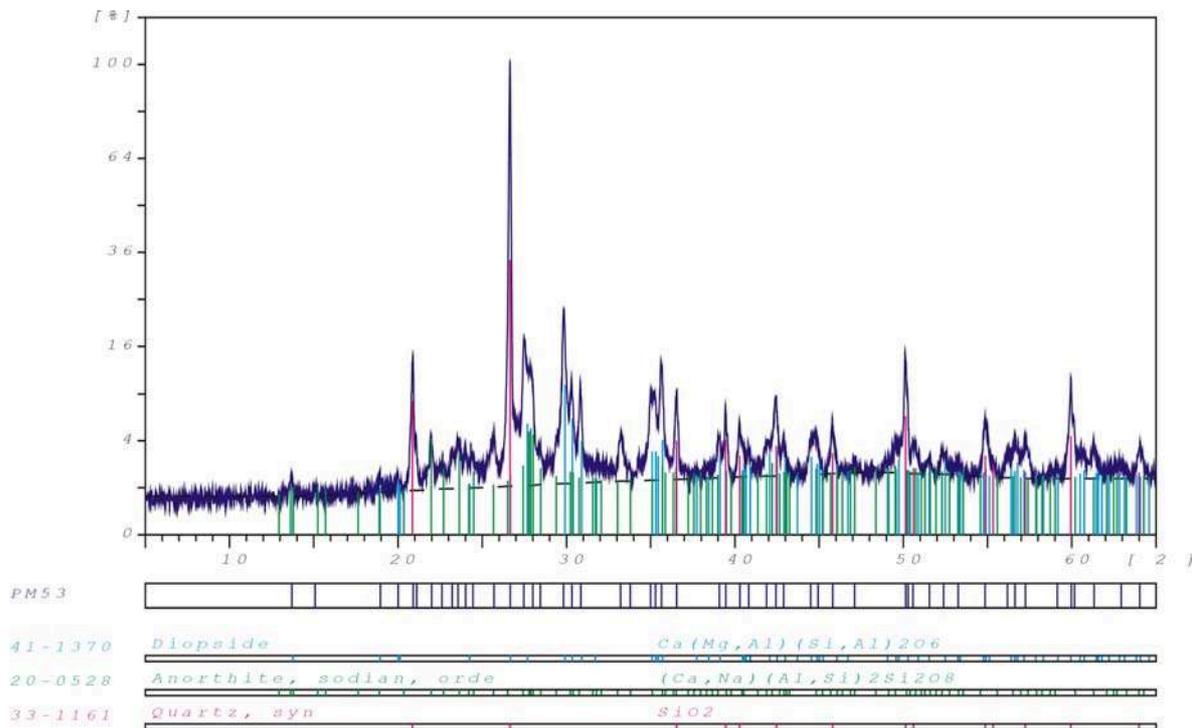
### 15) BK V - Zementmörtel



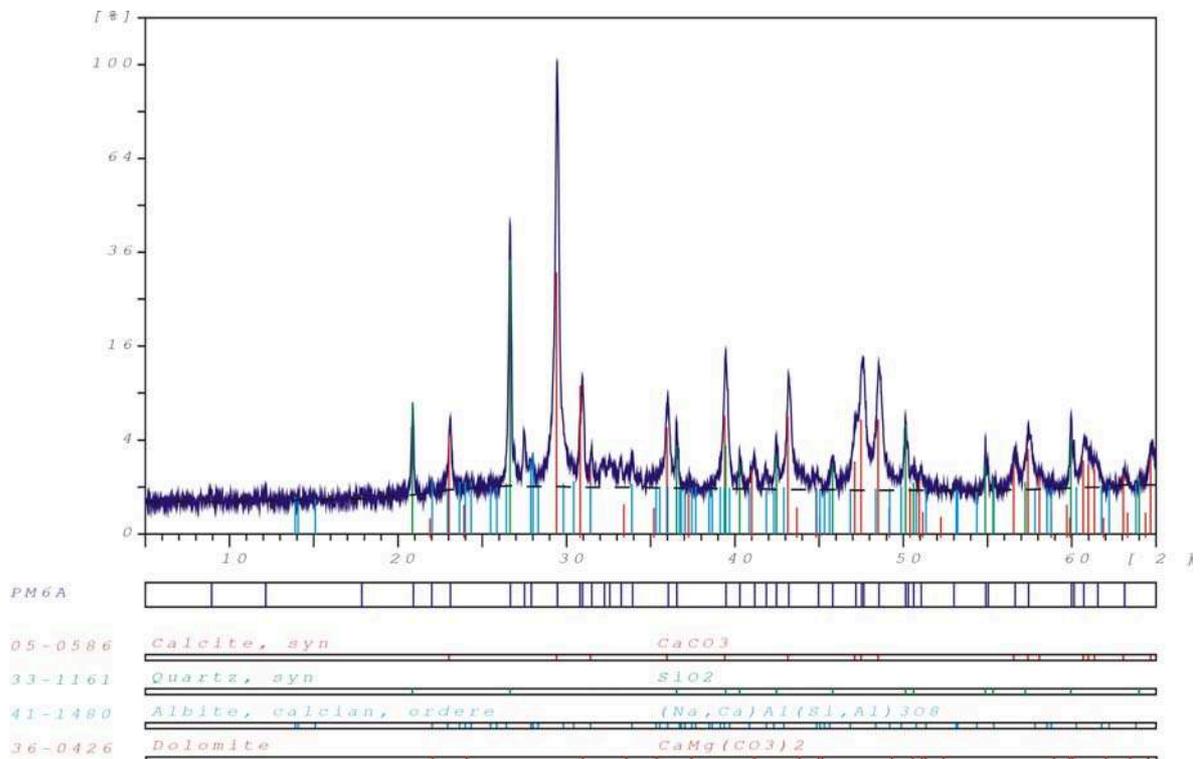
### 16) BK V – Kalkmörtel



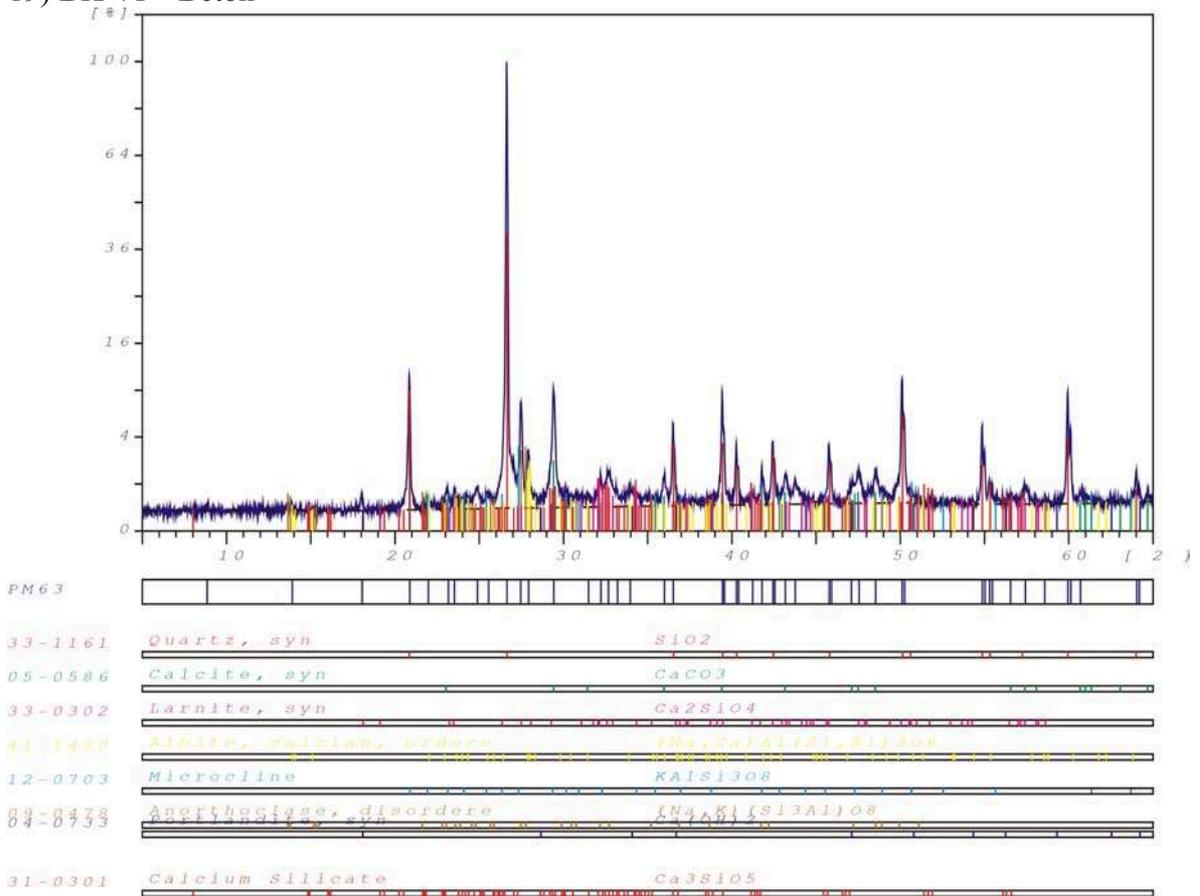
### 17) BK V – Ziegel



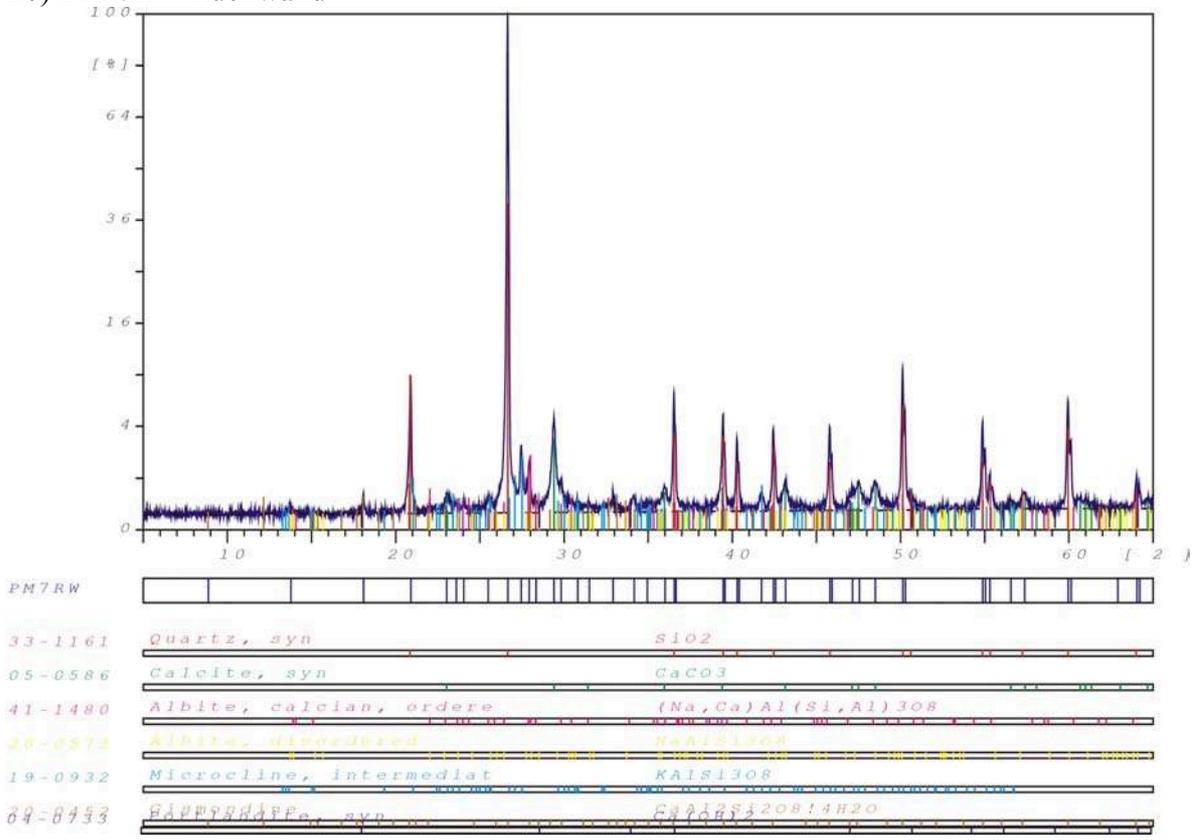
### 18) BK VI – Deckschicht



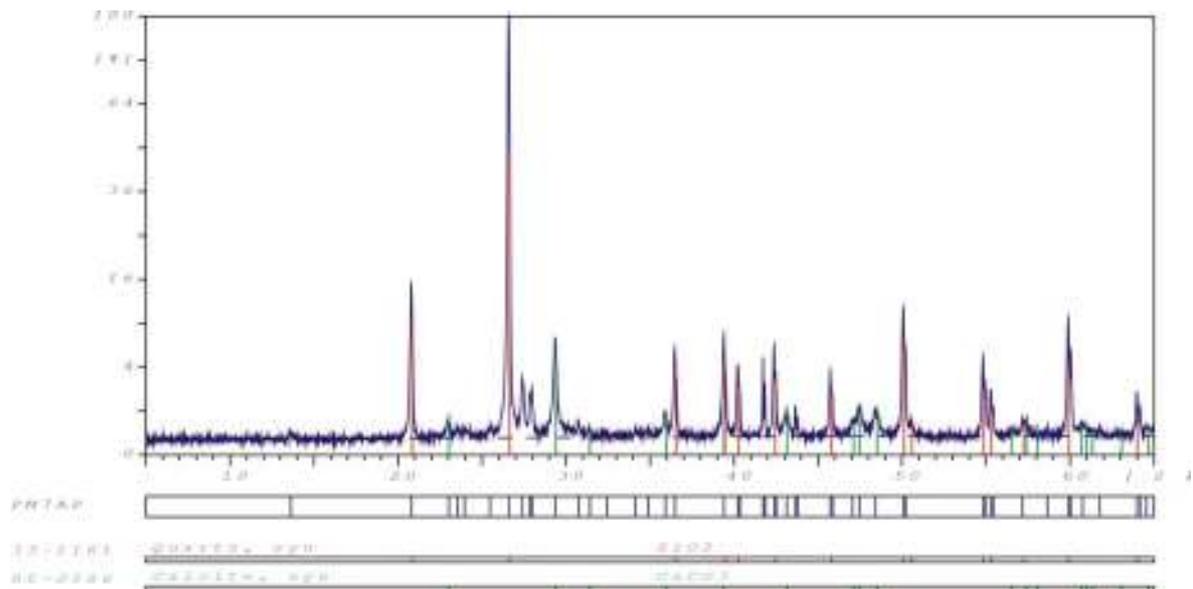
### 19) BK VI – Beton



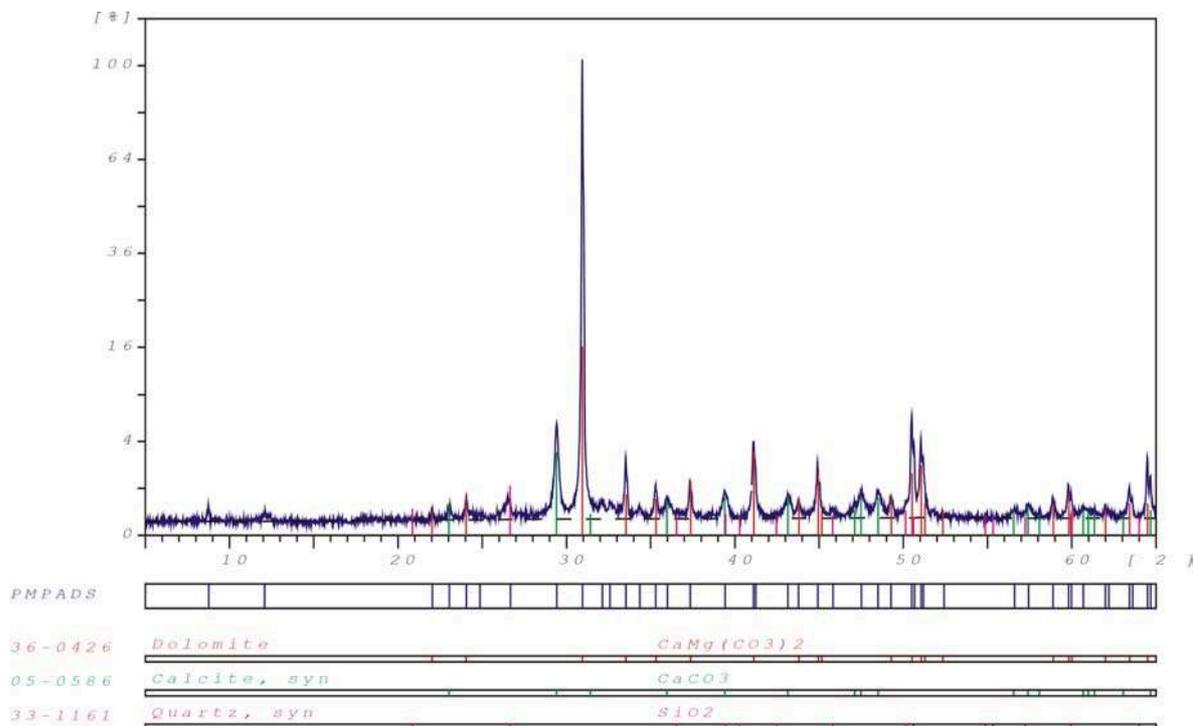
### 20) BK VII – Rückwand



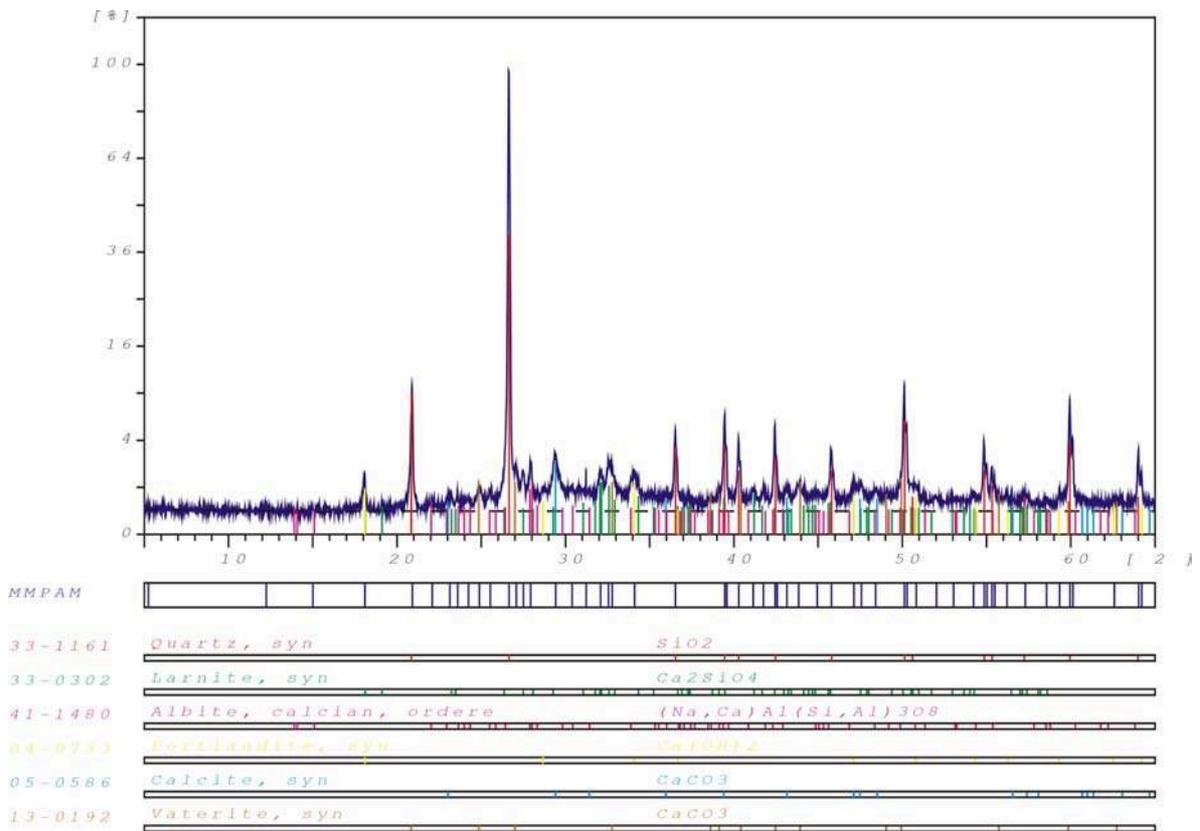
21) BK VII - Außenputz



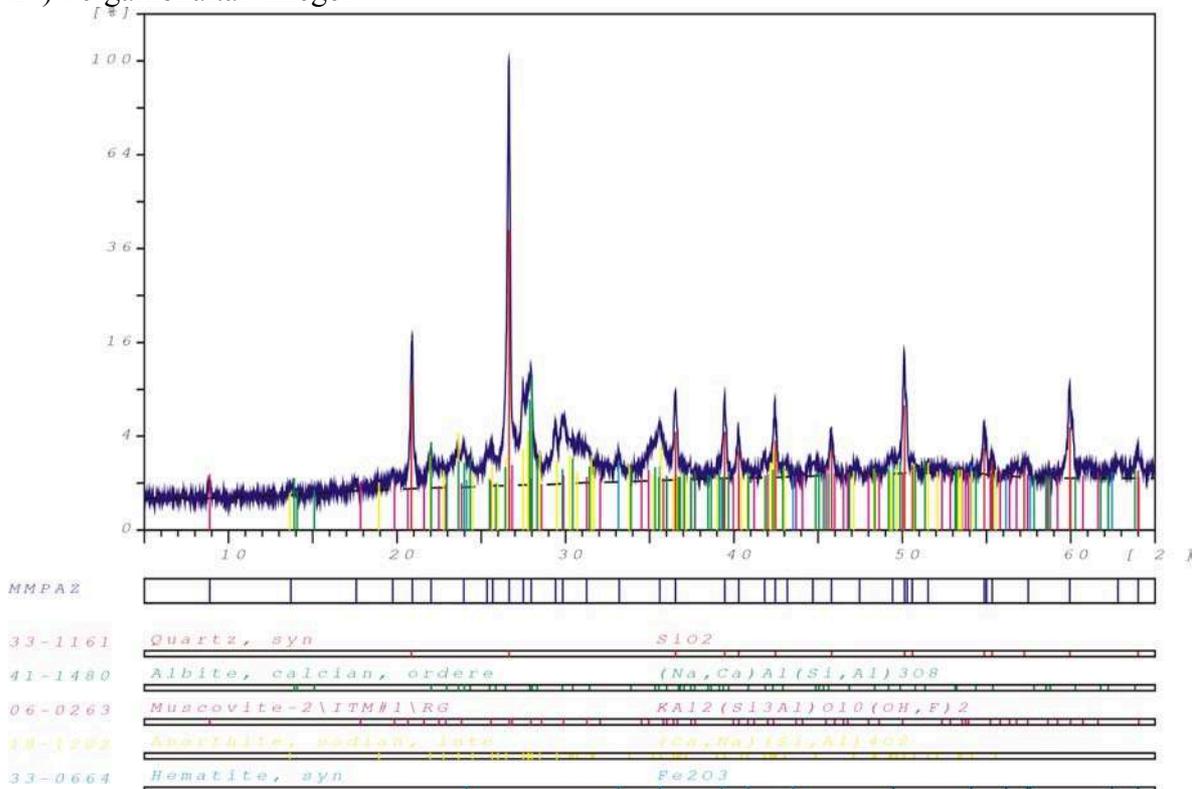
22) Pergamonaltar – Deckschicht



### 23) Pergamonaltar - Zementmörtel



### 24) Pergamonaltar -Ziegel



## **Danksagung:**

Als erstes möchte ich mich an dieser Stelle bei Prof. Dr. Siegesmund für die Vergabe dieser Arbeit bedanken. Weiter danke ich Prof. Dr. Nitsch für die Übernahme des Korreferats.

Mein besonderer Dank geht an Dr. Jörg Rüdlich, der mir durch die ständige Betreuung und das Korrektur lesen sehr geholfen hat.

Desweiteren möchte ich mich bei Herrn Dr. Kästner für die Bereitstellung des Probenmaterials danken.

Weiter möchte ich mich bei einigen Leuten aus der Universität Kassel, Fachgebiet Baustoffkunde, bedanken:

Ein besonderer geht hierbei an Dr. Bernhard Middendorf für die ständige Hilfsbereitschaft und die Hilfe bei der Dünnschliffmikroskopie.

Matthias Gerke für die RDA-Messung und das anschließende Auswerten der Proben.

U. Dumat für die Quecksilberdruckporositätsmessung.

Herrn Deiss für die Druckfestigkeitsbestimmung meiner Proben.

Auch möchte ich mich bei Verena Maack bedanken, die mir noch einige Literatur besorgen konnte.

Darüber hinaus danke ich auch Dr. Till Heinrichs für die Hilfestellung am Rasterelektronenmikroskop.

Ebenfalls möchte ich Thomas Weiss besonders für die Hifestellung der Probendokumentation bedanken.

Andreas Koch für die Hilfestellung bei der Auswertung der Klimadaten.

Bei Tobias Licha möchte ich mich besonders für die nächtliche Messung an der Ionenchromatographie und für die „Verbesserung“ im Methodik-Teil bedanken.

Der Firma Ibach danke ich für die Konservierung der Marmorzylinder.

Ein ganz liebes Dankeschön geht an Christina Heller für die Motivation und natürlich an meine Familie, die mich seelisch und moralisch immer unterstützt hat.

Ein großes Dankeschön noch mal an alle und natürlich auch an all diejenigen, die ich an dieser Stelle vergessen haben sollte.



## Anlage 10

Entwicklung kompatibler Vergussmörtel zur  
Instandsetzung der Säulen des Markttors von Milet im  
Berliner Pergamon Museum.

Diplomarbeit, Verena Maack, Institut für  
Bauingenieurwesen der Universität Kassel



**Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt**  
Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens  
Fachbereich 14 Bauingenieurwesen

**U N I K A S S E L**  
**V E R S I T Ä T**

# **Entwicklung kompatibler Vergussmörtel zur Instandsetzung der Säulen des Marktttores von Milet im Berliner Pergamon Museum**

Diplomarbeit

von

Verena Maack

angefertigt im März 2003

Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens

Universität Kassel

in Kooperation mit Prof. Dr. S. Siegesmund

vom Geowissenschaftlichen Zentrum der Universität Göttingen

**Bearbeitungszeitraum:**

01. – 03. 2003

**Prüfer:**

1. Dr. rer. nat. B. Middendorf

2. Prof. Dr.-Ing. habil. M. Schmidt

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	I-III
<b>Anhangsverzeichnis</b> .....	IV-VIII
<b>1 Einleitung</b> .....	1
1.1 Geschichte des Markttores von Milet .....	1
1.2 Aktueller baulicher Zustand des Markttores von Milet.....	2
1.3 Durchgeführte Untersuchungen am Markttor von Milet.....	3
<b>2 Marmor</b> .....	4
2.1 Begriffsdefinition .....	4
2.2 Unterschiede zwischen Kalkstein und Marmor .....	4
2.3 Der Aufbau und die Eigenschaften des Marmors.....	5
2.3.1 Der Kristall- und Gefügebau.....	5
2.3.2 Schäden an Marmoren und ihre Ursachen .....	6
2.3.3 Zusammenwirken von Mörteln und Marmor.....	8
2.3.4 Anforderungsprofil eines zu entwickelnden Vergussmörtels .....	9
<b>3 Die Beschreibung der verschiedenen Versuchsreihen</b> .....	11
3.1 Die Kompatibilitätsprüfung .....	11
3.1.1 Ziel der Untersuchung.....	11
3.1.2 Versuchvorbereitung .....	11
3.1.3 Versuchsdurchführung .....	12
3.2 Testreihen geeigneter Mischungen.....	12
3.2.1 Testreihe 1: M 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin mit Redoment oder Luftporenbildner.....	13
3.2.2 Testreihe 2: M 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin mit Redoment mit/ohne Luftporenbildner.....	13
3.2.3 Testreihe 3: Bestimmung des Luftporengehaltes.....	13
3.2.4 Testreihe 4: Optimierung des Zuschlags mit zwei Kalksteinmehlen .....	14
3.2.5 Testreihe 5: Ermittlung der Druckfestigkeiten von M1:2 und M 1:3 mit 20 Gew.-% Kaolin mit/ohne Zusatzmittel ...	14
3.2.6 Testreihe 6: Versuche mit Fließmittel Woerement FM 794 .....	15

---

3.2.7 Testreihe 7: Verträglichkeit des Mörtels mit Stahl .....	15
3.3 Auswahl möglicher geeigneter Mischungen .....	15
<b>4 Herstellungen der Mischungen und Lagerung .....</b>	<b>16</b>
4.1 Herstellung des Frischmörtels .....	16
4.2 Herstellung der Normprismen .....	17
4.3 Lagerung der Normprismen .....	17
<b>5 Beschreibung der Mess- und Untersuchungsmethoden .....</b>	<b>17</b>
5.1 Frischmörteluntersuchungen .....	17
5.1.1 Bestimmung der Konsistenz .....	17
5.1.2 Ermittlung der Verarbeitbarkeitszeit .....	18
5.1.3 Messung des Luftporengehaltes .....	18
5.1.4 Untersuchung des Wasserrückhaltevermögen .....	19
5.2 Festmörteluntersuchungen .....	20
5.2.1 Druck- und Biegezugfestigkeit .....	20
5.2.2 Ermittlung des dynamischen E-Moduls .....	21
5.2.3 Längenänderungsmessungen (Schwinden/Quellen) .....	22
5.2.4 Bestimmung des ungebunden CaO-Anteils .....	22
5.2.4.1 Das Prinzip .....	22
5.2.4.2 Geräte und Zubehör .....	22
5.2.4.3 Probenvorbereitung .....	23
5.2.4.4 Die Durchführung .....	23
5.2.5 Untersuchung des Ausblühverhaltens .....	24
5.2.6 Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck .....	24
5.3 Untersuchungsmethoden der Ausgangsstoffe und an ausgewählten erhärteten Mörtelproben .....	25
5.3.1 Röntgenphasenanalyse zur quantitativen Phasen- Phasenbestimmung .....	25
5.3.2 Lasergranulometrie .....	25
5.3.3 Quecksilberporosimetrie (MIP) .....	26
5.3.4 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchung (REM) .....	28
5.3.5 Lichtmikroskopische Untersuchung von Dünnschliffen .....	28

---

<b>6 Versuchsergebnisse und Auswertung</b> .....	28
6.1 Eigenschaften der Marmore und Steinerfüllungsstoffe .....	28
6.1.1 Kenngrößen der Marmore.....	28
6.1.2 Übersicht über die Steinerfüllungsstoffe .....	29
6.2 Charakterisierung der Ausgangsstoffe .....	30
6.2.1 Weißzement CEM I 52,5 N (sw).....	30
6.2.2 Calciniertes Kaolin Metastar 501 .....	31
6.2.3 Kalksteinmehl Calibrit.....	31
6.2.4 Quarzsand H 31 .....	32
6.2.5 Sonstige Zusatzstoffe.....	32
6.2.6 Zusatzmittel .....	32
6.3 Die Resultate der Testreihen .....	33
6.3.1 Ergebnis der Testreihe 1.....	33
6.3.2 Ergebnis der Testreihe 2.....	34
6.3.3 Ergebnis der Testreihe 3.....	34
6.3.4 Ergebnis der Testreihe 4.....	35
6.3.5 Ergebnis der Testreihe 5.....	36
6.3.6 Ergebnis der Testreihe 6.....	37
6.3.7 Ergebnis der Testreihe 7.....	37
6.4 Zusammenfassung und Bewertung der Testreihen 1-7 .....	38
6.5 Ergebnisse der Frischmörteltests an ausgewählten Mischungen .....	39
6.5.1 Beobachtungen bei der Einstellung des Ausbreitmaßes.....	39
6.5.2 Die Verarbeitungszeit.....	39
6.5.3 Luftporengehalte .....	39
6.5.4 Wasserrückhaltevermögen .....	40
6.6 Ergebnisse der Festmörteluntersuchungen .....	40
6.6.1 Druck- und Biegezugfestigkeiten .....	40
6.6.2 Dynamischer E-Modul.....	42
6.6.3 Quellen und Schwinden .....	43
6.6.4 Ungebundene CaO-Gehalte .....	44
6.6.5 Ausblühverhalten .....	46
6.6.6 Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck.....	46
6.7 Untersuchungen von Favoritmischungen.....	47
6.7.1 Porenverteilungen nach der Quecksilberporosimetrie .....	47

6.7.2 Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie.....	49
6.7.3 Beurteilung der Dünnschliffe .....	51
6.7.4 Abschließende Kompatibilitätsprüfung.....	53
6.8 Zusammenfassung der Resultate .....	54
6.9 Fazit .....	55
<b>7 Ausblick</b> .....	<b>56</b>

## Anhang

### Anhangsverzeichnis

A. 1.1: Beschreibung der Bohrprobe I-III .....	A 1
A. 2.1: Beschreibung der Bohrprobe IV-V.....	A 2
A. 3.1: Beschreibung der Bohrprobe VI-VII.....	A 3
A. 4.1: Kenndaten der Marmore des Markttores von Milet.....	A 4
A. 5.1: Ausgangsmischungen .....	A 5
A. 6.1: Kompatibilitätsprüfung mit Originalmarmor aus Milet .....	A 6
A. 7.1: Testreihe 1 .....	A 7
A. 7.2: Testreihe 2 .....	A 7
A. 8.1: Testreihe 3 .....	A 8
A. 8.2: Testreihe 4 .....	A 8
A. 9.1: Testreihe 5 .....	A 9
A. 10.1: Testreihe 6 .....	A 10
A. 10.2: Testreihe 7 .....	A 10
A. 11.1: Ausgewählte Mischungszusammensetzungen.....	A 11
A. 12.1: Röntgenogramm Weißzement.....	A 12
A. 13.1: Korngrößenverteilung Weißzement.....	A 13
A. 14.1: Röntgenogramm Metakaolin .....	A 14
A. 15.1: Korngrößenverteilung Metakaolin.....	A 15
A. 16.1: Röntgenogramm Calibrit.....	A 16
A. 17.1: Korngrößenverteilung Calibrit.....	A 17
A. 18.1: Korngrößenverteilung Quarzsand.....	A 18
A. 19.1: Röntgenogramm Kieselgur.....	A 19
A. 20.1: Korngrößenverteilung Omyacarb 2 BG .....	A 20
A. 21.1: Verarbeitungszeit der Favoritenmischungen .....	A 21
A. 21.3: Luftporengehalte der gewählten Mischungen.....	A 21
A. 22.1: Wasserrückhaltevermögen.....	A 22

---

A. 23.1:	Biegezugfestigkeiten M 1:2 20 F .....	A 23
A. 23.2:	Biegezugfestigkeiten M 1:2 20 FLP .....	A 23
A. 23.3:	Biegezugfestigkeiten M 1:2 20 .....	A 23
A. 23.4:	Biegezugfestigkeiten M 1:3 20 F .....	A 23
A. 24.1:	Biegezugfestigkeiten M 1:3 20 FLP .....	A 24
A. 24.2:	Biegezugfestigkeiten M 1:3 20 .....	A 24
A. 24.3:	Biegezugfestigkeiten M 1:4 20 F .....	A 24
A. 24.4:	Biegezugfestigkeiten M 1:4 20 FLP .....	A 24
A. 25.1:	Biegezugfestigkeiten M 1:4 20 .....	A 25
A. 25.2:	Biegezugfestigkeiten M 1:2 30 F .....	A 25
A. 25.3:	Biegezugfestigkeiten M 1:2 30 FLP .....	A 25
A. 25.4:	Biegezugfestigkeiten M 1:2 30 .....	A 25
A. 26.1:	Biegezugfestigkeiten M 1:3 30 F .....	A 26
A. 26.2:	Biegezugfestigkeiten M 1:3 30 FLP .....	A 26
A. 26.3:	Biegezugfestigkeiten M 1:3 30 .....	A 26
A. 26.4:	Biegezugfestigkeiten M 1:4 30 F .....	A 26
A. 27.1:	Biegezugfestigkeiten M 1:4 30 FLP .....	A 27
A. 27.2:	Biegezugfestigkeiten M 1:4 30 .....	A 27
A. 28.1:	Druckfestigkeiten M 1:2 20 F .....	A 28
A. 28.2:	Druckfestigkeiten M 1:2 20 FLP .....	A 28
A. 28.3:	Druckfestigkeiten M 1:2 20 .....	A 28
A. 29.1:	Druckfestigkeiten M 1:3 20 F .....	A 29
A. 29.2:	Druckfestigkeiten M 1:3 20 FLP .....	A 29
A. 29.3:	Druckfestigkeiten M 1:3 20 .....	A 29
A. 30.1:	Druckfestigkeiten M 1:4 20 F .....	A 30
A. 30.2:	Druckfestigkeiten M 1:4 20 FLP .....	A 30
A. 30.3:	Druckfestigkeiten M 1:4 20 .....	A 30
A. 31.1:	Druckfestigkeiten M 1:2 30 F .....	A 31
A. 31.2:	Druckfestigkeiten M 1:2 30 FLP .....	A 31
A. 31.3:	Druckfestigkeiten M 1:2 30 .....	A 31
A. 32.1:	Druckfestigkeiten M 1:3 30 F .....	A 32
A. 32.2:	Druckfestigkeiten M 1:3 30 FLP .....	A 32
A. 32.3:	Druckfestigkeiten M 1:3 30 .....	A 32
A. 33.1:	Druckfestigkeiten M 1:4 30 F .....	A 33

---

A. 33.2:	Druckfestigkeiten M 1:4 30 FLP .....	A 33
A. 33.3:	Druckfestigkeiten M 1:4 30 .....	A 33
A. 34.1:	Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit Fließmittel .....	A 34
A. 34.2:	Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit Fließmittel und Luftporenbildner .....	A 34
A. 35.1:	Druckfestigkeiten nach 28 Tagen der Mischungen mit 20 Gew.-% Kaolin .....	A 35
A. 35.2:	Druckfestigkeiten nach 28 Tagen der Mischungen mit 30 Gew.-% Kaolin .....	A 35
A. 36.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 20 F .....	A 36
A. 37.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 20 FLP .....	A 37
A. 38.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 20 .....	A 38
A. 39.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 20 F .....	A 39
A. 40.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 20 FLP .....	A 40
A. 41.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 20 .....	A 41
A. 42.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 20 F .....	A 42
A. 43.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 20 FLP .....	A 43
A. 44.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 20 .....	A 44
A. 45.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 30 F .....	A 45
A. 46.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 30 FLP .....	A 46
A. 47.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 30 .....	A 47
A. 48.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 30 F .....	A 48
A. 49.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 30 FLP .....	A 49
A. 50.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 30 .....	A 50
A. 51.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 30 F .....	A 51
A. 52.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 30 FLP .....	A 52
A. 53.1:	Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 30 .....	A 53
A. 54.1:	Schwindmaße M 1:2 20 F .....	A 54
A. 54.2:	Schwindmaße M 1:2 20 FLP .....	A 54
A. 55.1:	Schwindmaße M 1:2 20 .....	A 55
A. 55.2:	Schwindmaße M 1:3 20 F .....	A 55
A. 56.1:	Schwindmaße M 1:3 20 FLP .....	A 56
A. 56.2:	Schwindmaße M 1:3 20 .....	A 56
A. 57.1:	Schwindmaße M 1:4 20 F .....	A 57

---

A. 57.2:	Schwindmaße M 1:4 20 FLP .....	A 57
A. 58.1:	Schwindmaße M 1:4 20.....	A 58
A. 58.2:	Schwindmaße M 1:2 30 F.....	A 58
A. 59.1:	Schwindmaße M 1:2 30 FLP .....	A 59
A. 59.2:	Schwindmaße M 1:2 30.....	A 59
A. 60.1:	Schwindmaße M 1:3 30 F.....	A 60
A. 60.2:	Schwindmaße M 1:3 30 FLP .....	A 60
A. 61.1:	Schwindmaße M 1:3 30.....	A 61
A. 61.2:	Schwindmaße M 1:4 30 F.....	A 61
A. 62.1:	Schwindmaße M 1:4 30 FLP .....	A 62
A. 62.2:	Schwindmaße M 1:4 30.....	A 62
A. 63.1:	Schwindmaßentwicklung der Fließmittelmischungen .....	A 63
A. 63.2:	Schwindmaßentwicklung der Mischungen mit Fließmittel und Luftporenbildner.....	A 63
A. 64.1:	Schwindmaßentwicklung der Mischung ohne Fließmittel .....	A 64
A. 64.2:	Schwindmaßentwicklung des Bindemittelverhältnisses 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin mit/ohne Zusatzmittel .....	A 64
A. 65.1:	Bestimmung von ungebundenem CaO/Ca(OH) <sub>2</sub> nach 2 Tagen .....	A 65
A. 66.1:	Bestimmung von ungebundenem CaO/Ca(OH) <sub>2</sub> nach 7 Tagen .....	A 66
A. 67.1:	Bestimmung von ungebundenem CaO/Ca(OH) <sub>2</sub> nach 28 Tagen .....	A 67
A. 68.1:	Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck .....	A 68
A. 69.1:	Summenkurve M 1:2 20 F .....	A 69
A. 69.2:	Porenradienverteilung M1:2 20 F .....	A 69
A. 70.1:	Summenkurve M 1:2 20 FLP .....	A 70
A. 70.2:	Porenradienverteilung M1:2 20 FLP .....	A 70
A. 71.1:	Summenkurve M 1:2 30 F .....	A 71
A. 71.2:	Porenradienverteilung M1:2 30 F .....	A 71
A. 72.1:	Summenkurve M 1:2 30 FLP .....	A 72
A. 72.2:	Porenradienverteilung M1:2 30 FLP .....	A 72
A. 73.1:	Summenkurve M 1:4 20 F .....	A 73
A. 73.2:	Porenradienverteilung M1:4 20 F .....	A 73
A. 74.1:	Summenkurve M 1:4 30 F .....	A 74
A. 74.2:	Porenradienverteilung M1:4 30 F .....	A 74
A. 75.1:	Summenkurve M 1:4 30 FLP .....	A 75

---

A. 75.2:	Porenradienverteilung M1:4 30 FLP .....	A 75
A. 76.1:	Röntgenanalyse eines nichthydratisierten Zementkornes .....	A 76
A. 77.1:	Grobkörniger Marmor mit/ ohne Favoritenmörtel.....	A 77
A. 77.2:	Mittelkörniger Dolomitmarmor mit/ ohne Favoritenmörtel.....	A 77

## 1 Einleitung

### 1.1 Geschichte des Marktttores von Milet

Das Markttor von Milet wurde wahrscheinlich in den zwanziger Jahren des 2. Jahrhunderts n. Chr. am Staatsmarkt der kleinasiatischen Stadt Milet errichtet. Nachdem in byzantinischer Zeit das Markttor in die spätantike Stadtmauer integriert worden war, zerstörte ein Erdbeben Milet und damit auch das Markttor. Die Ausgrabung der Trümmer der zweistöckigen Fassade fand 1903 unter der Leitung des Archäologen T. Wiegand statt. Nach einer Fundteilung mit den türkischen Behörden wurden 1907-1908 die etwa zu 80% erhaltenen Bauteile, ca. 750 t Marmorfragmente der aufgehenden Säulenarchitektur, nach Berlin gebracht. Über einem nachgebauten Sockel baute man 1925 bis 1929 die Säulen unter Angabe des Architekten Hubert Knackfuß und der Leitung des Archäologen Wilhelm von Massow wieder zusammen. 1945 beschädigte ein Bombentreffer das Markttor. Erst nach einer zweijährigen Restaurierungsmaßnahme unter der archäologischen Leitung von H. H. Völker konnte der Miletsaal des Pergamonmuseums 1954 wieder für Besucher geöffnet werden (siehe Abb.1). Das Markttor von Milet hat eine herausragende archäologische Bedeutung als stilistische Vereinigung zwischen römischer und hellenistischer Bautradition. [1]



Abb.1: Gesamtansicht des Marktttores von Milet

## 1.2 Aktueller baulicher Zustand des Markttores von Milet [2]

Das Markttor von Milet bestand ursprünglich aus weißem Marmor. Da jedoch für den Wiederaufbau nicht alle Marmorteile zur Verfügung standen, wurden die fehlenden Stellen mit Steinerfüllstoffen ersetzt. Die Marmorsäulen wurden hohlgebohrt und in diesen Hohlraum wurde eine Stahlkonstruktion zur Stabilisierung der Gesamtstruktur installiert (siehe Abb.2: Ausgehöhlte Marmorsäule). Der Zwischenraum zwischen Stahl und Marmor ist mit Mörteln oder teilweise mit keramischen Formsteinen ausgefüllt worden. Der Sockel und die Decke bestehen aus Stahlbetonplatten, welche mit originalen Marmorfragmenten verkleidet worden sind.

Der fortschreitende Zerfall des Markttores ist deutlich zu erkennen. Neben den für Marmor typischen Schadensbildern wie Risse, Abplatzungen oder Vergrauungen, sind an der Kassettendecke Ausblühungen erkennbar (siehe Abb.3).



Abb.2: Ausgehöhlte Marmorsäule



Abb.3: Ausblühungen an der Kassettendecke

Im Zuge der Umbaumaßnahmen des Pergamonmuseums, die infolge von Untergrundproblemen notwendig werden, ist ein Abbau des Markttores von Milet wahrscheinlich unumgänglich. Während dieser Baumaßnahme soll eine Sanierung des Markttores stattfinden, d.h. die schädlichen Substanzen sollen entfernt und ein mit Marmor verträglicher Mörtel verwendet werden.

Der bauliche Zustand des Markttores wird im Rahmen eines DBU-Projekts charakterisiert und anhand dieser Untersuchungsergebnisse sollen auch kompatible Sanierungsmörtel entwickelt werden. Die Analyse der bestehenden Baubsubstanz wird in einer Zusammenarbeit mehrerer Forschungsstellen unter der Leitung der Universität Göttingen durchgeführt. Die Zielsetzung dieser Diplomarbeit im Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens der Universität Kassel ist die Entwicklung eines geeigneten Vergussmörtels für die Instandsetzung der hohlge-

bohrten Säulen. Um die Eigenschaften für diesen Mörtel genauer definieren zu können, ist eine genaue Kenntnis über die Eigenschaften des Marmors und der vorhandenen Steinerzänzungstoffe notwendig.

### 1.3 Durchgeführte Untersuchungen am Markttor von Milet

Eine Analyse der Mikroorganismen ist vom Institut für Mikrobiologie und Genetik der Universität Göttingen durchgeführt worden, um potentielle Schadensmechanismen zu verdeutlichen. Mögliche Verfärbungen des Marmors können ursächlich auch infolge des Bioimpaktes entstanden sein. Zur Untersuchung der Verformungsstabilität des Bauwerkes brachten die Mitarbeiter des Fachgebietes Werkstoffe des Bauwesens der Universität Kassel an vier Stellen induktive Wegaufnehmer an. Neben den Verformungen wurden auch die Temperaturen über einen Zeitraum von vier Monaten gemessen und mit Daten über die Besucheranzahl, Klima des Museums etc. korreliert. Eine eindeutige Aussage über die momentane Stabilität des Bauwerks kann erst nach einer genauen statischen Berechnung erfolgen. Zur Charakterisierung der Bausubstanz sind Bohrkernproben an sieben Stellen entnommen worden (vgl. Abb.4). Die Beschreibung der Bohrkernproben (siehe A 1 – A 3) sowie die Analyse der Mörtelproben werden in Kapitel 6.1.2 angesprochen. Die exakte Identifikation der ursprünglich eingesetzten Baustoffe ist Gegenstand der Diplomarbeit von Frau Müller der Universität Göttingen.[2]

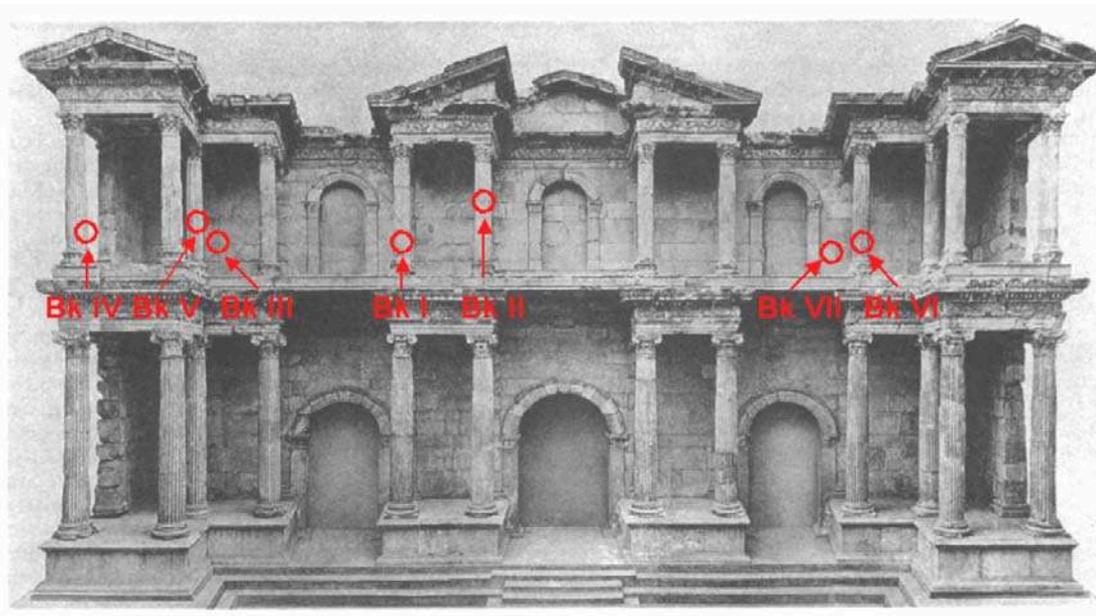


Abb.4: Bohrkernentnahmestellen am Markttor von Milet

## **2 Marmor**

### **2.1 Begriffsdefinition**

Zunächst gilt es den Begriff „Marmor“ korrekt zu definieren. Der Geowissenschaftler versteht unter „Marmor“ durch Metamorphose kristallin verändertes Kalkgestein [3,4]. Das heißt beide Stoffe haben die gleiche chemische Bezeichnung (Calciumcarbonat,  $\text{CaCO}_3$ ), aber unterschiedliche Kristallstrukturen [3,4]. Im Natursteingewerbe wird auch häufig dekorativ polierter Kalkstein als Marmor bezeichnet [5]. In dieser Diplomarbeit wird der Begriff „Marmor“ als wissenschaftliche Definition verwendet.

### **2.2 Unterschiede zwischen Kalkstein und Marmor**

Sedimentierter Kalkstein kann zum Marmor werden, wenn sich durch tektonische Bewegungen der Druck und die Temperaturen erhöhen, sodass es zu einer Rekristallisation der Calcit-Kristalle kommt. Neben der Bildung des Kristallgefüges treten noch weitere Veränderungen gegenüber dem Kalkstein auf. Statt einer eventuell vorhandenen Schichtung kommt es infolge der Druckbeanspruchung zu einer „Schieferung“, diese wird als wichtig für Dekorfragen erachtet. Ferner werden Fossilien durch die hohen Temperaturen metamorphisiert. Besonders auffällig können Farbveränderungen sein. Die im Kalkstein enthaltenen Pigmente bewirken im Marmor Schattierungen, die im Kalkstein nicht vorkommen, wie z.B. reines weiß, helles blau und grün in allen Schattierungen. Gerade die weiße Tönung mit einer gewissen Transparenz ist das Markenzeichen eines qualitativ hochwertigen Marmors. Die gute Bearbeitbarkeit des Marmors haben schon die Steinmetze in der Antike festgestellt und daher dieses Gestein häufig für Gebäude und Skulpturen benutzt. [5]

## 2.3 Der Aufbau und die Eigenschaften des Marmors

### 2.3.1 Der Kristall- und Gefügebau

Die Eigenschaften eines Stoffes hängen sehr stark von der Kristallform und dem Kristallgefüge ab. Calcit ( $\text{CaCO}_3$ ) kristallisiert trigonal-skalenoedrisch in der Raumgruppe R3c [3] (vgl. Abb.5). Die Kristalle zeigen oftmals ein unterschiedliches

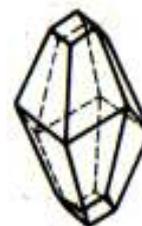


Abb. 5: Calcitkristall [6]

thermisches Verhalten in verschiedenen Richtungen, abhängig von der Symmetrie [6]. Diese Anisotropie äußert sich u.a. in der Härte, Spaltbarkeit, Lichtbrechung, dem elastischen und dem plastischen Verhalten des Stoffes [6]. Die gute mechanische Verarbeitung des Marmors resultiert aus der Härte 3 auf der Mohsschen Härteskala [7]. Außerdem zählt Calcit zu den Mineralen mit einer hohen Doppelbrechung des Lichtes an den Kristalloberflächen [7]. Des



Abb. 6: Marmor, Carrara, Vergr. 30 mal [3]

weiteren besitzen Marmore eine interkristalline Kornbindung, d.h. die Körner sind direkt ohne Bindemittel miteinander verwachsen [8]. Neben dem interkristallinen Gefüge weisen Marmore häufig eine feine Parallelstreifung der Kristallflächen auf; Calcit hat eine typische polysynthetische Zwillingslamellierung [3] (vgl. Abb.5). Man unterscheidet die Korngrößen der Marmorkristalle in:

- feinkristallin 0,063 mm – 0,63 mm
- mittelkristallin 0,63 mm – 6,3 mm
- grobkristallin >6,3 mm [3]

Die Druckfestigkeit von Marmor liegt im Schnitt bei  $90 \text{ N/mm}^2$  [7]. Die Biegezugfestigkeit beträgt bei Marmoren etwa  $15 \text{ N/mm}^2$ . Aufgrund dieser Festigkeiten und einer Rohdichte, die i.d.R.  $2,7 \text{ g/cm}^3$  ist, können ungestörte Marmore (nach DIN 52105) sogar für weitspannende Konstruktionen verwendet werden [7]. Eine niedrige Wasseraufnahme und eine gute Frostbeständigkeit erklärt sich durch die geringe Porosität ( $< 0,2 \%$ ) [7]. Die genauen Kenndaten der Marmore von Milet sind im Anhang (A 4) aufgelistet.

Um die Komplexität des Marmors erfassen und einen geeigneten Mörtel entwickeln zu können, werden im folgenden die typischsten Schäden und ihre Ursachen erläutert.

### 2.3.2 Schäden an Marmoren und ihre Ursachen

Eine der häufigsten Schadensfälle an Marmorbauteilen ist die Verbiegung, die bis zum Kollaps von Marmorobjekten führen kann. Für die Deformationen gibt es mehrere Ursachen, zum Einen können Verschiebungen an den Spalt- und Gleitflächen der Kristalle bei Druck- und Biegezugbelastung oder unter der Wirkung des Eigengewichtes entstehen. Hierfür spricht die bruchlose Umformung von Marmor unter verhältnismäßig niedrigen Temperatur- und Druckbedingungen, da Calcit leicht zu Gleitungen und der Bildung von Druckzwillingen neigt. Zum Anderen verursachen Temperaturwechsel Mikrorisse an den Korngrenzen und führen so zu Verschiebungen. Die unterschiedlich gerichteten Kristalle erzeugen aufgrund ihrer thermischen Anisotropie Spannungsdifferenzen und somit Risse im Gefüge. [8]

In welcher Weise diese Einflüsse zur Verformung führen, ist in der Literatur noch nicht eindeutig geklärt. Die sich wiederholenden Dehnungseffekte infolge von Erwärmungen summieren sich mit der Zeit und so werden die Verformungen immer größer. Bei Platten entstehen Verwerfungen infolge einseitiger Erwärmung und Feuchtigkeitsbeanspruchung. Hierbei verlieren die Kristalle ihre Bindungskräfte zueinander und somit auch an Festigkeit, d.h. der Marmor „zuckert“. Mehrere Autoren haben dieses Verhalten des Marmors beobachtet. Wunderlich und Ritter sind der Auffassung, dass eine Erwärmung eine Verformung hervorruft, und diese eine Gefügauflockerung verursacht. Im Gegensatz zu den Aussagen von Geikie, Vogt und Grimm, welche eine andere Auffassung von Ursache und Wirkung haben. Laut dieser Autoren bewirken die äußeren Einflüsse wie z.B. Erwärmung eine Entfestigung des Gefügeverbandes, was eine Verformung zur Folge hat. Für diese These gibt es laut Grimm eine Erklärung: Ein Objekt, dessen Gefüge sich infolge der äußeren Einflüsse auflockert und dessen Porenraum sich erweitert, muss sich allseitig ausdehnen. Wird diese Dehnung seitlich behindert, kommt es zur Verbiegung. Die Zerfallsentwicklung des Marmors ist je nach Kristallgröße unterschiedlich. Bei feinkristallinen Marmoren ist die Oberfläche schnell abgewittert, da die Anzahl der Angriffsflächen größer ist als bei gröberen Kristallen. Eine Aufrauhung der Oberfläche bleibt zurück und bietet eine viel größere Fläche für neue Angriffe. Die Zerstörung des Korngefüges bei grobkristallinen Marmoren findet zunächst unter der Oberfläche statt. Das Aufbrechen an den Korngrenzen erfolgt später, dafür aber mit einem möglicherweise größeren

Massenverlust als bei den feinkristallinen Marmoren. Des weiteren beeinflusst die Korngröße die Sprödigkeit des Gesteines. Steinmetze haben herausgefunden, dass z.B. „der feinkristalline Carrara-Marmor „zäh“ reagiert und keine Ausbrüche zeigt, während der grobkristalline Naxos-Marmor „spröd“ ist und beim Bearbeiten leichter ausbricht. Außerdem beeinflusst die Kornform und die Gitterregelung nach kristallographischen Achsen die Gefügefestigkeit. Ein richtungsloses körniges Gefüge setzt die Festigkeit herauf, während ein geregeltes Gefüge den Verband schwächt, da z.B. die Spaltbarkeiten gleichgerichtet sind. Richtungslose körnige Gefüge erzeugen infolge thermischer Beanspruchungen höhere Spannungen aufgrund der Anisotropie der Kristalle. Somit sind die Verwitterungsauswirkungen stärker als bei gleichgerichteten Strukturen. Auch die Verzahnung der Körner miteinander kann messtechnisch erfasst werden. Bei idealer Kugelgestalt hat dieser sogenannte Formfaktor den Wert 1. Je mehr Korn-an-Korn-Verzahnungen der Marmor besitzt desto geringer ist dieser Faktor. Man unterscheidet auch die Kornbindungsfestigkeit. Es gibt subvalente oder schwache Bindungen, d.h. der Bruch erfolgt an den Korngrenzen, während bei prävalenten oder starken Bindungen die Risse durch die Körner verlaufen. Als Maß für die Auflockerung des Gefüges dient der dynamische E-Modul und die Biegezugfestigkeit. Je höher die Porosität des Marmors desto geringer ist der E-Modul (siehe Anhang A 4). Am Beispiel von Marmorleisten hat man bei einer Befeuchtung der Objekte einen spontanen Bruch beobachtet. Der erhöhte Wassersättigungsgrad setzte möglicherweise den E-Modul herab. Bucher (1956) hält die Feuchtigkeit sogar für die ausschlaggebende Ursache der Verformungen, da bisher nur in Gebieten mit vielen Niederschlägen diese Verschiebungen aufgetreten wären. In Ländern wie Griechenland oder Ägypten habe er noch nie von dieser Problematik gehört. Man kann frischen und verwitterten Marmor anhand ihrer unterschiedlichen Porositäten und Porenverteilungen erkennen. Die Gesamtporosität von frischem, unverwittertem Marmor, der größtenteils Mikroporen und feine Kapillarporen besitzt, ist meist kleiner als 1 Vol.-%. Der bereits entfestigte Marmor weist zunehmend Kapillarporen auf und die Gesamtporosität kann mehr als 10 Vol.-% betragen. Die Folgen dieser verschiedenen Porenstrukturen sind eine steigende Permeabilität des verwitterten Marmors gegenüber Flüssigkeiten und Gasen, sowie eine erhöhte Wasseraufnahme infolge des Kapillardruckes. Durch eine Testreihe an entfestigten und frischen Marmorproben zeigte Schürmeister (1995) wie diese

Unterschiede in der Porenstruktur zu differenten Eigenschaften führen. So betrug die kapillare Steighöhe bei den frischen Marmoren ca. 10 mm. Dagegen erreichten die verwitterten Proben 40–100 mm. Ähnliche Unterschiede traten auch bei der Wasseraufnahme auf. Diese führt oftmals zu Ausblühungen oder Schädigung des Marmors infolge Frosttauwechsels.[8]

*Zusammenfassung:*

*Marmor besitzt eine unmittelbare Kornbindung und sich anisotrop verhaltende Kristalle. Wird die Kornbindung entfestigt, kommt es zum Materialzerfall. Diese Erweiterung des Porenraumes wird durch Erwärmungen und Feuchtigkeit beschleunigt. Eine Kenngröße die über diesen Zerfall d.h. die zunehmende Porosität Auskunft gibt, ist der E-Modul.*

### **2.3.3 Zusammenwirkung von Mörteln und Marmor**

Am Beispiel der Athener Akropolis einem der weltweit bekanntesten aus Marmor bestehenden Denkmäler wird im folgenden auf die chemischen Eigenschaften des Marmors in Verbindung mit Mörteln eingegangen. Dieses Monument ist der Witterung ausgesetzt und so ist der Materialzerfall vorprogrammiert. Zur Restauration des beschädigten Marmors wurden vom Ende des letzten Jahrhunderts bis 1975 Mörtel auf der Basis von Magnesiumoxychloridzement (MOC) sogenannter „Sorelzement“ eingesetzt. Dieser Zement hat folgende Vorteile: ein ähnliches Aussehen wie der Marmor, eine hohe Frühfestigkeit, eine geringe Wärmedehnung und einen guten Widerstand gegen Abrieb. Jedoch war der Sorelzement nicht wetterfest und er verfärbte den Marmor. Aber nicht nur an den bewetterten Seiten traten Schäden auf, sondern auch in den geschützten Bereichen. Die verwendeten Mörtelmischungen setzten sich aus kaustisch calciniertem Magnesium (MgO), Magnesiumchlorid, Kalksteinmehl und Sand zusammen. Der vorhandene Wasserüberschuss erleichterte die Verarbeitbarkeit. Als Ursache für die Schäden ist die Karbonatisierung der Oxychloride zu Oxycarbonaten, welche mit einer Volumenerhöhung einhergeht. Diese Volumenveränderung in den verschiedenen Mörtelschichten verursachen Risse im Mörtel und Marmor. Die äußere Oxychloridschicht wirkt wie ein Schutzmantel und verlangsamt den Karbonatisierungsprozess. Dieser Effekt tritt insbesondere an den vom Regen geschützten Flächen auf. Wenn das Oxychlorid und Mörtel mit sulfathaltigen Gasen in Kontakt kommt,

entstehen Hydratsulfatsalze. Diese Salze entstehen unter Volumenzunahme und verursachen ebenfalls Risse und Verfärbungen. Neben den Hydratsulfatsalzen sind noch sogenannte Sekundärsalze wie z.B. Gips entstanden, die das Material auch zerstören. Aus dieser Schadensanalyse wird deutlich, dass der Sorelzement nicht für den Einsatz in Marmorbauwerken, wie der Akropolis geeignet ist.[9]

*Zusammenfassung:*

*Der verwendete Mörtel ist gequollen und hat schädigende Salze gebildet, die aufgrund des Wasserüberschusses in den Marmor eindringen und ihn schädigen konnten.*

#### **2.3.4 Anforderungsprofil eines zu entwickelnden Vergussmörtels**

Anhand der bisherigen Ausführungen lässt sich das Anforderungsprofil für den zu entwickelnden Mörtel ableiten. Aus dem negativen Beispiel der Volumenzunahme des Sorelzementes ist die geringe Quell- und Schwindneigung als Merkmal des Mörtels eine notwendige Bedingung. Der Mörtel darf kein zu hohes Schwindmaß aufweisen, da er als Vergussmörtel eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Marmorsäule und Stahlkonstruktion darstellen muss. Des weiteren sollte er nicht ausblühen, da Salze den Marmor zerstören (vgl. Kapitel 2.3.3). Ein hohes Wasser-rückhaltevermögen zusammen mit einem schnellen Abbindeverhalten verhindert, dass die Mörtellösung in die Poren des Marmors eindringen kann und Verfärbungen oder die Entfestigung des Korngefüges verursacht (vgl. Kapitel 2.3.2 und 2.3.3). Eine Anpassung der Festigkeit und des dynamischen E-Moduls an die Kennwerte des Marmors ist erforderlich, da bei auftretenden Dehnungen oder Verschiebungen beide Materialien ähnlich reagieren sollten. Ein solches Verhalten würde Schäden, wie Abplatzungen oder Risse minimieren. Neben der Kompatibilität des Mörtels zum Marmor sollte auch eine Korrosionsschutz für den Stahl gegeben sein, d.h. der Mörtel sollte einen pH-Wert von über 9,5 haben [6]. Bei einem Stahl, der in einer Lösung mit einem pH-Wert kleiner als 9,5 gelagert ist, beginnt zu korrodieren. Dies ist nicht erwünscht, da die Korrosion des Stahls mit einer Volumenzunahme auf das 2,5 fache des Ausgangsvolumens verbunden ist [6] und somit den Mörtel als auch den Marmor durch „Sprengung“ schaden würde. Eine gute Verarbeitbarkeit sowie die Fließfähigkeit sind notwendig, um das Vergießen des Mörtels zu ermöglichen.

Tab.1: Erwünschte Eigenschaften des Mörtels

<b>erwünschte Eigenschaften des Mörtels</b>	<b>Ziele</b>
dem Marmor angepasste Festigkeit/ E-Modul	keine Risse und Abplatzungen infolge unterschiedlicher Dehnungen
niedrige Schwind-/ Quellmaße	Erhaltung des Verbundes Marmor/Mörtel
geringer Calciumhydroxidgehalt	keine Verfärbung des Marmors
ausreichend hohe Alkalität	Stahlkorrosionsschutz
hohes Wasserrückhaltevermögen	Vermeidung des Eindringens von
schnelles Abbindeverhalten	Porenlösung in den Marmor
geringe Ausblühneigung	Vermeidung der Auskristallisation von Salzen: Zerstörung des Marmors

Ziel dieser Diplomarbeit ist die Entwicklung eines Mörtels der den oben genannten Ansprüchen genügt, um eine erfolgreiche Sanierung des Markttors von Milet zu gewährleisten. In dieser Arbeit wurden folgende Materialien verwendet:

- Weißzement: CEM I 52,5 N (sw) der Firma Dyckerhoff ist geeignet wegen seiner Farbe, dem geringen C<sub>4</sub>AF-Gehalt und der hohen Frühfestigkeit.
- Puzzolane: Kieselgur der Firma Seitz Schenk oder calciniertes Kaolin Metastar 501 der Firma Imerys bewirken eine Reduktion des Ca(OH)<sub>2</sub>-gehaltes, um das Verfärbungsrisiko durch alkalische Porenlösung zu minimieren.
- Zuschläge: Quarzsand H31 der Quarzwerke Frechen sowie die Kalksteinmehle Calibrit oder Omyocarb 2B der Firma Omya sollen eine optimale Konsistenz und hohe Packungsdichte des Mörtels gewährleisten.
- Fließmittel: Redoment der Firma Rethmeier oder Woerement FM 794 der Firma Woermann setzen den Wasserbindemittel-Wert (w/b) herab und verringern so die Schwindneigung des Mörtels
- Luftporenbildner: wie der Luftporenbildner 20 oder das Mörtelzusatzmittel MMO/AP der Firma Sicotan oder die Mikrohohlaglaskugeln S32 der Firma 3M sollen die Dichte reduzieren, um den Untergrund sowie die Struktur zu entlasten

### 3 Die Beschreibung der verschiedenen Versuchsreihen

In den folgenden Kapiteln werden zur Vereinfachung der Schrifttums folgende Abkürzungen für die verwendeten Stoffe eingeführt. Die Bindemittel/Zuschlag-Verhältnisse mit der Angabe des Puzzolangehaltes in Gew.-% wurden größtenteils aus den Vorarbeiten von Frau Dipl.-Ing. Ott (Anhang: A 5) übernommen. Die Bezeichnung M 1:2 20% KAO F LP besagt, dass in dieser **Mischung Fließmittel Redoment** als auch der Luftporenbildner **LP 20** und **20% Kaolin** enthalten sind und das Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis bei **1:2** liegt.

CEM: Weißzement CEM I 52,5 N (sw) der Firma Dyckerhoff

KG: Kieselgur der Firma Seitz Schenk

KAO: calciniertes Kaolin Metastar 501 der Firma Imerys

H31: Quarzsand H31 der Quarzwerke Frechen

Cal: Calibrit der Firma Omya

Omy: Omyocarb 2BG der Firma Omya

FM oder F: Redoment der Firma Rethmeier

FM 794: Woerement FM 794 der Firma Woermann

LP 20 oder LP: Luftporenbildner 20 der Firma Sicotan

MMO: Mörtelzusatzmittel MMO/AP der Firma Sicotan

MHG: Mikrohohlglaskugeln S32 der Firma 3M

Einige Mischungen aus den Versuchsreihen von Frau Dipl.-Ing. Ott ( vgl. A 5) wurden als Grundlage für Mischungsvariationen verwendet.

#### 3.1 Die Kompatibilitätsprüfung

##### 3.1.1 Ziel der Untersuchung

Ziel dieser Prüfung ist die Erkennung möglicher Verfärbungen des Marmors durch die Einwirkung der Porenlösung des Mörtels. Um diese Frage klären zu können, ist die Herstellung von Dünnschliffen mit in Mörtel eingebettetem Originalmarmor notwendig. Die sehr begrenzte Menge des Originalmarmors läßt aber nur eine geringe Anzahl von Proben zu.

##### 3.1.2 Versuchsvorbereitung

Der vorhandene Originalmarmor wird auf eine Korngröße von 2–4 mm mit einer Beißzange vorsichtig zerkleinert. Bei der Zerkleinerung wird darauf geachtet, möglichst eine nur rein weiße Körnung zu erhalten.

### 3.1.3 Versuchsdurchführung

In Anlehnung an die Mörtel Nr. 13-17 (siehe A 5) werden die Marmormischungen (M1-M5) mit dem Bindemittel/Zuschlag-Wert (b/z-Wert) von 1:2 hergestellt. Aufgrund des hohen Zement- und dem relativ niedrigen Puzzolananteil von 20 Gew.-% hat diese Mischung auch den höchsten  $\text{Ca(OH)}_2$ -Gehalt, welcher ein Reaktionsprodukt der Zementphasen  $\text{C}_2\text{S}$  und  $\text{C}_3\text{S}$  ist. Da in den Ausgangsmischungen der Quarzsand H31 benutzt wurde, und die Proben M1-M5 mit Marmor der Korngröße 2-4 mm hergestellt werden, können die w/b-Werte nicht verglichen werden. Die im Rahmen dieser Diplomarbeit angefertigten Marmormischungen werden annähernd auf die gleichen Ausbreitmaße eingestellt wie die Mörtel (13-17) der Ausgangsmischungen (vgl. A 5).

Tab.2: Mörtelmischungen mit Marmor als Zuschlag (A6)

Bezeichnung	w/b-Wert	Zement [M.-%]	Kaolin [M.-%]	Kieselgur [M.-%]
Ma 1	0,52	100	-	-
Ma 2	0,7	80	20	-
Ma 3	0,73	70	30	-
Ma 4	0,86	60	40	-
Ma 5	0,76	80	-	20

Für die Anfertigung der Probekörper werden Normprismenformen mit den Abmessungen (40 mm\*40 mm\*160 mm) nach DIN 1164 Teil 7 benutzt. Zwei Tage nach der Herstellung werden die Marmorprismen ausgeschalt und in drei Teile zersägt. Ein Teil wird im Klimaraum bei einer Temperatur von  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$  und  $(60\pm 5)\%$  rel. Luftfeuchte, der andere Teil in einer Calciumhydroxidlösung (0,2 g/l) gelagert und der Dritte wird in ein Wasserbad gelegt. Nach 28 Tagen Lagerung sind Dünnschliffe von den jeweiligen Proben angefertigt worden, auf denen mögliche Verfärbungen mit Hilfe eines Polarisationsmikroskops untersucht werden können.

### 3.2 Testreihen geeigneter Mischungen

Das Ziel der Testreihen ist die Entwicklung von geeigneten Mörtelmischungen. Die Frischmörtel- und teilweise auch Festmörtelprüfungen dienen zur Untersuchung der Mörtel Eigenschaften der verschiedenen Zusammensetzungen. Anhand der

Ergebnisse soll eine Charakterisierung der Mörtel Eigenschaften erfolgen. In den Testreihen 1–4 wurde ausschließlich der Quarzsand H31 als Zuschlag verwendet.

### 3.2.1 Testreihe 1: M1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin mit Redoment oder Luftporenbildner

In dieser Testreihe werden verschiedene Betonzusatzmitteln der Mischung 1:2 mit 20 % Kaolin hinzugefügt und die Ausbreitmaße ermittelt.

Tab.3: Mörtelmischungen der Testreihe 1(A 7)

Bezeichnung	w/b-Wert	FM [M.-%]	MMO [M.-%]	LP [M.-%]	MHG [Vol.-%]	Ausbreitmaße [cm]
M 1	0,58	-	-	-	-	17,0/17,5
M 1.1	0,56	-	0,256	-	-	18,0/17,5
M 1.2	0,52	-	-	0,3125	-	17,5/17,5
M 1.3	0,59	-	-	-	10	17,5/17,5
M 1.4	0,48	2	-	-	-	18,0/18,5

### 3.2.2 Testreihe 2: M1:2 mit 20Gew.-% Kaolin mit Redoment mit/ohne Luftporenbildner

Unter der Verwendung der Zusammensetzung 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin werden das Fließmittel Redoment und die Kombinationen von Fließmittel und Luftporenbildner optimiert. Ziel ist das Erreichen eines möglichst geringen w/b-Wertes. Trotzdem soll eine gute Verarbeitbarkeit erhalten bleiben.

Tab.4: Mörtelmischungen der Testreihe 2 (A 7)

Bezeichnung	w/b-Wert	FM [M.-%]	MMO [M.-%]	LP [M.-%]	MHG [Vol.-%]	Ausbreitmaße [cm]
M 1.5	0,4	3	-	-	-	17,0/17,5
M 1.6	0,4	2	0,256	-	-	18,0/19,0
M 1.7	0,4	1,5	-	0,3125	-	17,0/17,0
M 1.8	0,4	3	-	-	10	17,5/18,0

### 3.2.3 Testreihe 3: Bestimmung des Luftporengehaltes

Die Mischungszusammensetzung M1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin und Kombinationen der Betonzusatzmittel werden mit der 4-fachen Menge der Testreihen 1 und 2

hergestellt. Die Bestimmung des Luftporengehaltes erfolgt mit dem sogenannten LP-Topf. Von jeder Mischung wird ein Normprisma hergestellt und mit einer Plastikfolie abgedeckt. Eine Verdichtung findet nicht statt. Nach dem Ausschalen, einen Tag nach der Herstellung, wird das Gewicht der Prismen bestimmt. Die Gewichtsermittlung dient der Bestimmung der Dichte. Der Luftporengehalt und die Dichte sollen Aufschluss über die Wirksamkeit der verschiedenen Luftporenbildner geben.

Tab.5: Mörtelmischungen der Testreihe 3 (A 8)

Bezeichnung	w/b- Wert	FM [M.-%]	MMO [M.-%]	LP [M.-%]	MHG [Vol.-%]	Ausbreitmaße [cm]
M 1.9	0,4	3	-	-	-	17,0/17,5
M 1.10	0,4	2	0,256	-	-	13,0/14,0
M 1.11	0,4	1,5	-	0,3125	-	14,5/13,0
M 1.12	0,4	3	-	-	10	15,0/14,0
M 1.13	0,58	-	-	-	-	18,0/17,5

### 3.2.4 Testreihe 4: Optimierung des Zuschlags mit zwei Kalksteinmehlen

Die Mischung 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin wird im Verhältnis 2:3 Kalksteinmehl/H31 mit jeweils einem der beiden Kalksteinmehle und mit einer Kombination von Fließmittel Redoment und LP 20 oder nur mit LP 20 oder ohne jegliche Beton-zusatzmittel hergestellt (vgl. A 8). Ziel dieser Testreihe ist die Auswahl eines Kalksteinmehles in einem geeigneten Verhältnis von Kalksteinmehl/H31.

### 3.2.5 Testreihe 5: Ermittlung der Druckfestigkeiten von M 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin und M 1:3 mit 20 Gew.-% Kaolin mit/ohne Betonzusatzmittel

Die Mischungen M 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin und M 1:3 mit 20 Gew.-% Kaolin werden mit dem Zuschlagverhältnis 2:3 von Calibrit/H31 und verschiedenen Zusatzmittelkombinationen hergestellt. Die Mischungen werden in Normprismen gefüllt und nach einem Tag Lagerung unter einer Plastikfolie ausgeschalt. Die Ermittlung des dynamischen E-Moduls und der Druckfestigkeit findet nach 7 Tagen Lagerung bei  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  und  $(60 \pm 5) \%$  Luftfeuchte statt. Ziel dieser Testreihe ist die Beurteilung der Festmörteleigenschaften unter Berücksichtigung des Einsatzes der Zusatzmittel und der verschiedenen Bindemittel zu Zuschlagverhältnisse.

Tab.6: Mörtelmischungen der Testreihe 5 (A 9)

Bezeichnung	w/b- Wert	FM [M.-%]	LP [M.-%]	MHG [Vol.-%]	Ausbreitmaße [cm]
M 2.1	0,46	7,5	-	-	25,0/26,0
M 2.2	0,42	7,5	3,125	-	19,0/20,0
M 2.3	0,44	7,5	-	10	21,0/19,0
M 2.4	0,74	-	-	-	19,0/19,0
M 3.1	0,58	8,125	-	-	21,0/21,0
M 3.2	0,55	8,125	3,125	-	21,0/20,5
M 3.3	0,6	8,125	-	10	20,0/20,5
M 3.4	0,93	-	-	-	19,5/20,0

### 3.2.6 Testreihe 6: Versuche mit Fließmittel Woerement FM 794

Mit der Mischung 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin und mit den gleichen Zuschlägen wie in Testreihe 5 werden 1,5% und 2% FM 794 (A.10.1: MW 1.1) oder das Fließmittel Redoment (A.10.1: MF 1.1) in Abhängigkeit vom Zementgehalt hinzugegeben. Der w/b-Wert beträgt 0,4. Ein Vergleich der beiden Fließmittel soll nach augenscheinlichen Betrachtungen zeigen, welches der beiden Fließmittel besser geeignet ist.

### 3.2.7 Testreihe 7: Verträglichkeit des Mörtels mit Stahl

Um die Verträglichkeit der verschiedenen Mischungen mit Stahl zu bestätigen, wird in einigen Mischungen (vgl. A.10.2) Bewehrungsstahl in die Normprismen eingebaut. Die Herstellung und Lagerung der Prismen erfolgt wie in Kapitel 4.3 beschrieben ist. 90 Tage nach der Herstellung wird mittels eines Phenolphthaleintests die Alkalität des Mörtels und der Korrosionszustand des Stahles beurteilt.

## 3.3 Auswahl möglicher geeigneter Mischungen

Nach diesen Testreihen wird ein einheitliches Ausbreitmaß für alle Zusammensetzungen auf 24–25 cm festgelegt, da bei dieser Konsistenz ein Verguss des Mörtels ohne Verdichtungsmaßnahmen möglich ist. Die Mischungen mit Kieselgur, MHG, MMO, ohne Puzzolan sowie mit FM 794 werden aus den in Kapitel 6.4 näher ausgeführten Gründen für die ausgewählten Mischungen (Kapitel 6.5 ff.). Das Zuschlagverhältnis von Calibrite/H31 beträgt bei allen Mischungen 2:3. Als Puzzolan wird somit nur noch Kaolin verwendet. Aus diesem Grund wird z.B. die Bezeichnung „20% KAO“ verkürzt nur noch mit „20“ angegeben. So ergeben sich

nach der Optimierung des Fließmittels Redoment und dem LP 20-gehalt folgende 18 Mischungszusammensetzungen:

Tab.7: Ausgewählte Mischungszusammensetzungen (A 11)

Bezeichnung	w/b-Wert	FM Redoment [M.-%]	LP 20 [M.-%]	Ausbreitmaße [cm]
M 1:2 20 F	0,48	7,500	-	24,5/24,5
M 1:2 20 FLP	0,51	7,500	1	24,5/25,0
M 1:2 20	0,96	-	-	24,0/24,0
M 1:3 20 F	0,59	8,750	-	25,0/25,5
M 1:3 20 FLP	0,59	8,750	1	24,5/24,0
M 1:3 20	1,17	-	-	24,5/24,5
M 1:4 20 F	0,73	9,166	-	25,0/24,5
M 1:4 20 FLP	0,73	9,166	1	24,0/24,0
M 1:4 20	1,31	-	-	24,5/24,5
M 1:2 30 F	0,50	8,571	-	24,0/25,0
M 1:2 30 FLP	0,50	8,571	1	24,0/24,0
M 1:2 30	1,00	-	-	24,0/24,0
M 1:3 30 F	0,61	10	-	24,0/24,5
M 1:3 30 FLP	0,61	10	1	24,5/24,0
M 1:3 30	1,20	-	-	24,0/24,0
M 1:4 30 F	0,73	10,476	-	24,0/24,5
M 1:4 30 FLP	0,73	10,476	1	24,5/25,0
M 1:4 30	1,40	-	-	24,0/24,0

## 4 Herstellung der Mischungen und Lagerung

### 4.1 Herstellung des Frischmörtels

Die Gewichtsangaben der verschiedenen Mischungszusammensetzungen sind dem Anhang (A 11) zu entnehmen. Zuerst werden die Zuschläge, das Kaolin und der Zement abgewogen und in den Mischtroge eines Mörtelmischers (nach DIN 1164 – 7) gegeben. Der Mörtelmischer ist ca. 30 Sekunden auf Betriebsstufe 1 (Handbetrieb) zu aktivieren, um die Trockensubstanzen zu homogenisieren. Danach werden das Wasser und gegebenenfalls das Fließmittel und/oder der Luftporenbildner abgewogen und zusammen in ein Gefäß gefüllt. Die Zugabe der Flüssigkeiten erfolgt auf einmal und nach einer Mischzeit von 5 Minuten auf der

Betriebsstufe 1 wird das Gerät abgestellt. In den Testreihen 1-7 (vgl. Kapitel 3.2) werden teilweise Mikrohohlglaskugeln verwendet. Die Volumenbestimmung erfolgt mit einem Standzylinder mit Maßeinteilung in ml. Die Mikrohohlglaskugeln sind den Trockensubstanzen zuzugeben.

## **4.2 Herstellung der Normprismen**

Nach der Herstellung des Frischmörtels (vgl. Kapitel 4.1) wird dieser in Normprismenformen gegossen. Je Mischung werden in einer Form drei Prismen hergestellt. Eine Verdichtung wird nicht vorgenommen, da es sich hier um selbstverdichtenden Vergussmörtel handelt. Die Oberfläche der frischen Prismen wird mit einem Lineal glatt gestrichen und mit einer Plastikfolie überdeckt, um ein anfängliches Austrocknen des Mörtels zu verhindern.

## **4.3 Lagerung der Normprismen**

Nach einem Tag werden die, wie in Kapitel 4.1 und 4.2 beschrieben, hergestellten Prismen ausgeschalt und in einen Plastikbeutel verpackt (in Anlehnung an DIN EN 1015-11). Die Lagerung der verpackten Prismen erfolgt auf Prismenschiene bei einer Temperatur von  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $(60\pm 5)\%$ . Nach 7 Tagen wird der Plastikbeutel entfernt und die Lagerung im gleichen Klima fortgesetzt. Bei den Prismen für die Schwindmessungen wird auf die Verpackung in den Plastikbeutel verzichtet, um das größtmögliche Schwinden messen zu können. Die Mischungen ohne Betonzusatzmittel sind beim Ausschalen noch nicht vollständig ausgehärtet und nass.

# **5 Beschreibung der Mess- und Untersuchungsmethoden**

## **5.1 Frischmörteluntersuchungen**

### **5.1.1 Bestimmung der Konsistenz**

Die Bestimmung der Konsistenz der Frischmörtel wird mit dem Ausbreittisch in Anlehnung an DIN EN 1015 Teil 3 durchgeführt. Der Frischmörtel wird wie in Kapitel 4.1 beschrieben angerührt und in einen definierten Setztrichter auf dem Ausbreittisch gefüllt. Eine zusätzliche Verdichtung findet nicht statt. Nach Entfernung des Setztrichters ist der Ausbreittisch 15 mal anzuheben und fallenzulassen. Nach der zweimal rechtwinklig zueinander erfolgten Messung des Durchmesser des ausgebreiteten Mörtels, wird der Mittelwert ermittelt; das Aus-

---

breitmaß. Ziel der Prüfung ist die Bestimmung der Eigenschaften des Frischmörtels wie z.B. die Fließfähigkeit. Der Wasser- und Bindemittelgehalt sowie Kornform und Kornzusammensetzung haben einen entscheidenden Einfluss auf das Ausbreitmaß. Außerdem können durch die Festlegung eines bestimmten Ausbreitmaßes verschiedene Mischungsvariationen hinsichtlich der Konsistenz miteinander verglichen werden.

### **5.1.2 Ermittlung der Verarbeitbarkeitszeit**

Die Verarbeitbarkeitszeit wird in Anlehnung an DIN EN 1015 Teil 9 über das Ausbreitmaß (vgl. Kapitel 5.1.1) bestimmt. Die Verarbeitbarkeitszeit ist die Zeit nach deren Ablauf sich das Ausbreitmaß, welches 10 Minuten nach Beendigung des Mischvorganges ermittelt wurde, um 30 mm verringert hat.

Ziel der Untersuchung ist die Feststellung, in welchem Zeitraum sich eine Mörtelmischung ohne die Zugabe von Wasser oder sonstigen Stoffen verarbeiten lässt.

### **5.1.3 Messung des Luftporengehaltes**

Die Bestimmung des Luftporengehaltes erfolgt mit Hilfe eines LP-Topfes nach DIN 18555 Teil 2. Das Prinzip der DIN 18555 Teil 2 ist das Gleiche wie in der aktuellen DIN EN 1015 Teil 7. Eine wie in Kapitel 4.1 beschrieben hergestellte Mörtelmenge wird in ein festgelegtes Messgefäß eingebracht und nicht verdichtet, da in der späteren Anwendung auch keine Verdichtung stattfinden soll. Auf die Mörteloberfläche wird Wasser aufgebracht und anschließend der Deckel des LP-Topfs aufgesetzt. Durch eine Pumpe wird ein Luftdruck über dem Wasser aufgebaut und dieses in den Mörtel gepresst, was eine Verdrängung der in den Poren enthaltenen Luft zur Folge hat. Der Wasserstand sinkt und ist somit ein Maß für das Luftvolumen, das aus dem Mörtel verdrängt wurde. Das Ergebnis kann am LP-Topf prozentual abgelesen werden.

Ziel dieser Untersuchung ist die Ermittlung des Luftporengehaltes im Frischmörtel, um auf die Dichte des Festmörtels schließen zu können. Zudem lässt sich die Wirksamkeit des in einigen Mischungen verwendeten Luftporenbildners darstellen und variieren.

#### 5.1.4 Untersuchung des Wasserrückhaltevermögens

Das Wasserrückhaltevermögen eines Frischmörtels ist der in Prozent ausgedrückte Wasseranteil, der nach dem kapillaren Wasserentzug durch eine saugfähige Unterlage im Mörtel verbleibt. Diese Prüfung wird in Anlehnung an DIN 18555 Teil 7 ausgeführt. Die in der DIN vorgeschriebenen Filterplatten und Faservliese der Firma Schleicher und Schüll werden nicht mehr produziert. Aus diesem Grund kommt als Ersatz des Faservlieses ein Sieb mit der Korngröße 0,063 mm und statt der Filterplatte ein saugendes Papiermaterial zum Einsatz. Diese Prüfung dient ausschließlich zum Vergleich der ausgewählten Mischungen miteinander. Nachdem die Trockengewichte des Versuchsaufbaus und des Papiermaterials ermittelt worden sind, wird der Frischmörtel direkt nach der Herstellung in den Konus eingefüllt. Nach einer Wartezeit von 5 Minuten bestimmt man das Gewicht des Versuchsaufbaus und des feuchten Papiermaterials. Aus diesen Daten errechnet sich das Wasserrückhaltevermögen (WRV) nach folgenden Formeln:

Wassergehalt des Prüfmörtels ( $W_1$ ) [g]:

$$W_1 = m_1 / (m_1 + m_2)$$

$m_1$ : Gesamtwassergewicht im Frischmörtel [g]

$m_2$ : Trockenmörtelmenge [g]

Wassermenge des Mörtels im Kunststoffring ( $W_2$ ) [g]:

$$W_2 = (m_4 - m_3) * W_1$$

$m_3$ : Gewicht des gesamten Versuchsaufbaus ohne Mörtel [g]

$m_4$ : Gewicht des gesamten Versuchsaufbaus mit Mörtel [g]

Vom Papiermaterial aufgesaugte Wassermenge ( $W_3$ ) [g]:

$$W_3 = m_6 - m_5$$

$m_5$ : Gewicht des trockenen Papiermaterials [g]

$m_6$ : Gewicht des feuchten Papiermaterials [g]

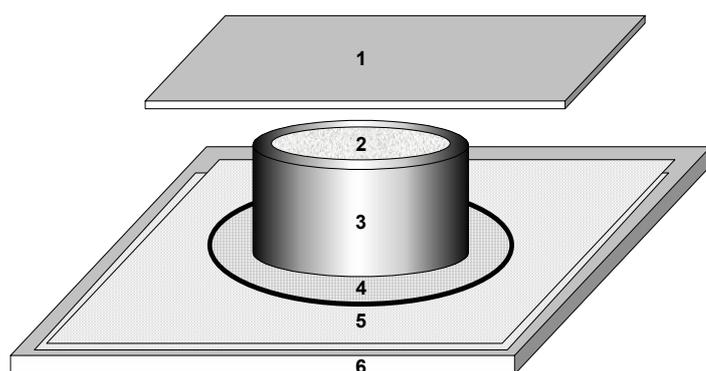
Relativer Wasserverlust des Mörtels ( $W_4$ ) [%]:

$$W_4 = W_3 / W_2 * 100$$

**Wasserrückhaltevermögen (WRV) [%]:**

$$\text{WRV} = 100 - W_4$$

Versuchsaufbau:  
Wasserrückhaltevermögen

**Legende:**

- 1 Glasplatte
- 2 Frischmörtel
- 3 Zylinder ( innen  
konisch )  
Ø innen oben :7,5 cm  
Ø innen unten :6,5 cm
- 4 Stahlsieb mit der  
Korngröße: 0,063 mm
- 5 saugendes Papier-  
material
- 6 Glasplatte

Abb.7: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens

Ziel dieser Untersuchung ist die Feststellung, ob der Mörtel freies Wasser an eine saugende Umgebung in einer bestimmten Zeit abgeben kann. Diese Eigenschaft kann entscheidend sein, wenn die angrenzenden Marmorflächen saugen und auf die Lösung reagieren z.B. mit Verfärbungen.

## 5.2 Festmörteluntersuchungen

### 5.2.1 Druck- und Biegezugfestigkeit

Die Biegezugfestigkeitsprüfung erfolgt nach DIN 1164 mit einer Universalprüfmaschine von der Firma Instron, Modell 6025 mit einer 10 KN Messdose. Die Druckfestigkeit wird nach DIN 18555 mit einer 100 KN Messdose an dem gleichen Gerät ermittelt. Da aber einige Prismen nicht mit dieser Maschine bis zum Bruch gefahren werden konnten, kommt teilweise eine vier Säulenprüfmaschine der Firma Toni Technik mit einer Höchstleistung von 4000 KN zum Einsatz. Die Biegezugfestigkeit von Mörteln wird geprüft, indem Normprismen, die nach Kapitel 4 hergestellt und gelagert wurden, mittels einer Dreipunktbelastung bis zum Bruch beansprucht werden. Die Druckfestigkeit des Mörtels wird mit einer Druckfläche

(40 mm\*40 mm) an den beiden Prismenhälften, welche bei der Biegezugprüfung entstanden sind, durchgeführt. Die Bestimmung der Biegezug- und Druckfestigkeiten findet nach Erhärungszeiten von 2, 7 und 28 Tagen statt.

### 5.2.2 Ermittlung des dynamischen E-Moduls

Der dynamische E-Modul wird an einem Steinkamp Ultrasonic Tester BP-7 der Firma Wekob (DIN/ISO 8047) mit dem Grindo-Sonic-Verfahren an den erhärteten Mörtelprismen (160mm\*40mm\*40mm) ermittelt. Das Messverfahren arbeitet mit Impulserregung und Frequenzanalyse. Der Probekörper wird durch einen leichten mechanischen Impuls in Longitudinalrichtung angeregt. In der Phase des freien Ausschwingens des Körpers wird die Eigenfrequenz analysiert und als Laufzeit von zwei Perioden in  $\mu\text{s}$  auf dem Display ausgegeben. Mit der Kenntnis der Abmessungen, der Rohdichte und der Laufzeit kann der dynamische E-Modul eines Mörtelprismas nach folgenden Formeln berechnet werden.

Berechnung der Schallgeschwindigkeit  $v_s$  [mm/s]:

$$v_s = (l / t_s) * 1000$$

Berechnung des dynamischen E-Moduls  $E_{\text{dyn.}}$  [N/mm<sup>2</sup>]:

$$E_{\text{dyn.}} = [k * (v_s)^2 * \rho] / 1000$$

$$k = (1 + \mu) * (1 - 2\mu) / (1 - \mu)$$

$l$ : Länge [mm] (hier 160mm)

$t_s$ : gemessene Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]

$\mu$ : Querkontraktionszahl hier gewählt : 0,2 (für Beton)

$\rho$ : Dichte [g/cm<sup>3</sup>]

Durch die Kenntnis des dynamischen E-Moduls wird die Verformbarkeit des Mörtels beschrieben, d.h. mögliche auftretende Spannungen infolge von Schwinden, Wärmedehnung können beurteilt werden. Die Ermittlung des E-Moduls erfolgt nach 2, 7 und 28 Tagen.

### 5.2.3 Längenänderungsmessungen (Schwinden/Quellen)

Die Längenänderungsmessungen werden mit dem BAM Setzdehnungsmesser Bauart Pfender durchgeführt. Die wie in Kapitel 4 beschrieben hergestellten Mörtelprismen werden einen Tag nach der Herstellung ausgeschalt und mittig an der Ober- und Unterseite im Abstand von 10 cm mit zwei Messzapfen versehen. Die Lagerung der Prismen erfolgt bei einer Temperatur von  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$  und einer Luftfeuchtigkeit von  $(60\pm 5)\%$ . Die Proben werden die ersten Tage nicht in einer geschlossenen Plastiktüte aufbewahrt, um die größtmöglichen Längenänderungen durch das Austrocknen messen zu können. Die Messungen sind in der ersten Woche täglich und danach zwei Wochen lang zwei bis dreitägig durchgeführt worden.

Diese Untersuchung soll helfen mögliche Schwindspannungen und somit Folgeschäden infolge des Schwindens oder Quellens beurteilen zu können.

### 5.2.4 Bestimmung des ungebundenen CaO-Anteils [10]

#### 5.2.4.1 Das Prinzip

Durch das Kochen des Mörtels in destilliertem Wasser wird der ungebundene CaO - Anteil freigesetzt, und mit Salzsäure titriert. Eine Unterschreitung des Neutralpunktes ist durch die Verwendung des Indikators Phenolphthalein und der geringen Titrationsgeschwindigkeit kaum möglich.

#### 5.2.4.2 Geräte und Zubehör

- Waage, 0,001 g genau
- 50 ml Bürette mit Schellbachstreifen und 0,1 ml Teilung
- Erlenmeyerkolben oder Bechergläser
- Uhrgläser, ca. 60 mm Ø
- Salzsäure, 1 N HCl
- Phenolphthaleinlösung, 1g Phenolphthalein in 100 ml Methanol gelöst
- pH-Elektrode
- Heizbarer Magnetrührer mit Rührstäbchen
- 1 Wasserkocher, ausschließlich zu verwenden für destilliertes oder entmineralisiertes Wasser

### 5.2.4.3 Probenvorbereitung

Die Festmörtelproben werden wie in Kapitel 4 beschrieben hergestellt und gelagert. Einen Tag vor der Bestimmung des ungebundenen CaO-Anteils sind die Mörtel analysenfein aufzumahlen ( $< 0,2$  mm) und mit einer Genauigkeit von 0,001 g auf 10 g genau abzuwiegen. Die Lagerung bis zur Versuchsdurchführung erfolgt in luftdicht abgeschlossenen Glasgefäßen.

### 5.2.4.4 Die Durchführung

In einem Vorversuch wird erprobt, bei welcher Öffnung des Hahnes der Bürette in 5 sec etwa 1 ml der Salzsäure ausläuft. In dem Kocher wird entmineralisiertes Wasser gekocht, abgekühlt und 200 ml in einen Erlenmeyerkolben gefüllt. Nach der Zugabe des abgewogenen, gemahlten Mörtels und des Magnetrührers in den Erlenmeyerkolben wird dieser mit einem Uhrglas bedeckt und auf einem beheizbaren Magnetrührer zum Sieden gebracht. Nach einer Siedezeit von 4 Minuten lässt man das Mörtelwassergemisch auf Raumtemperatur abkühlen. Mit 50 ml entmineralisiertem Wasser wird die Wandung des Erlenmeyerkolbens abgespritzt, um dort verbleibenden Lösungsreste zu entfernen. Nach der Zugabe einiger Tropfen Phenolphthaleinlösung färbt sich die Lösung rötlich und die Titration kann beginnen. Unter den Bewegungen des unbeheizten Magnetrührers wird mit der gleichen Geschwindigkeit wie im beschriebenen Vorversuch die Salzsäure hinzuge tropft bis sich die Lösung gerade bleibend entfärbt. Ohne weitere Zugabe der Säure beginnt unter Rühren eine Wartezeit von 60 Sekunden und anschließend wird mit der gleichen Geschwindigkeit zu Ende titriert. Nach Beendigung der Titration tritt wieder eine Rotfärbung ein. Diese bleibt jedoch unbeachtet. Der Verbrauch der Salzsäure ist der Bürettenskala zu entnehmen. Mit diesem Wert können die Anteile des ungebundenen CaO und des ungebundenen  $\text{Ca(OH)}_2$  in Prozent nach folgenden Formeln berechnet werden.

$$\text{CaO ungebunden [ \% ]} = x * 2,8 * f / E$$

$$\text{Ca(OH)}_2 \text{ ungebunden [ \% ]} = x * 3,7 * f / E$$

x : verbrauchte 1 N HCl in ml

f : Faktor der 1 NHCl ( Dieser Faktor liegt zwischen 1,02 und 0,98; und wird in diesen Versuchsreihen vereinfachend zu 1,00 angenommen )

E : Einwaage in g

Die Durchführung der Titration erfordert etwas Übung in der Handhabung der Gerätschaften. Die Schwierigkeit liegt in der wiederkehrenden Einstellung des Hahnes, so dass alle Proben mit der gleichen Geschwindigkeit titriert werden. Teilweise treten aus diesem Grund bei den Ergebnissen Schwankungen auf. Diese Prüfung wird nach 2, 7 und 28 Tagen jeweils zweimal je Mischung durchgeführt. Der Zweck der Prüfung ist die Bestimmung des ungebundenen CaO-Anteils, der daher schnell zu  $\text{Ca(OH)}_2$  umgesetzt werden kann oder bereits als  $\text{Ca(OH)}_2$  vorliegt. Mit der Kenntnis des  $\text{Ca(OH)}_2$ -Gehaltes kann die Wirksamkeit des Puzzolanes und die Alkalität des Mörtels beurteilt werden.

#### **5.2.5 Untersuchung des Ausblühverhaltens [11]**

Die wie in Kapitel 4 beschrieben hergestellten 3 Normprismen werden 7 Tage in einem luftdicht abgeschlossenen Plastikbeutel in einem Klima mit  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$  und  $(65\pm 5)\%$  rel. Luftfeuchte gelagert. Danach liegen die Proben einen Tag stirnseitig 10 mm tief im Wasser und nach 2 Tagen Trocknung werden die Proben einen Tag im Wasser gelagert. Dieser Zyklus wird 10 mal unter Raumklimabedingungen wiederholt. Die Prüfung dient zur Beurteilung der Ausblühneigung des Mörtels, d.h. das Vorhandensein von ausblühfähigen, wasserlöslichen Salzen und die Intensität der Ausblühungen.

#### **5.2.6 Bestimmung der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck [11]**

Das Prüfverfahren wird in Anlehnung an DIN 52103 (Prüfung von Naturstein und Gesteinskörnungen; Bestimmung von Wasseraufnahme und Sättigungswert) durchgeführt. Die Prüfung ist an 3 Normprismen je Mischung in entmineralisiertem Wasser durchzuführen. Nach einer Vorlagerung von 28 Tagen bei einer Temperatur von  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$  und  $(60\pm 5)\%$  rel. Luftfeuchte werden die Proben gewogen (Masse  $m_d$ ). Danach sind sie eine Stunde bis zur Hälfte, dann vollständig mit  $(20\pm 5)$  mm Überdeckung in entmineralisiertem Wasser unter Atmosphärendruck bei einer Raumtemperatur von  $20^\circ\text{C}$  bis zur Massekonstanz gewesen und wieder gewogen worden (Masse  $m_{w,a}$ ).

Die Wasseraufnahme in g :  $W_a = m_{w,a} - m_d$

Die Wasseraufnahme in M.-%:  $W_{m,a} = (W_a / m_d) * 100$

Die Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck dient zur Kennzeichnung der feuchtetechnischen Eigenschaften des Mörtels.

### **5.3 Untersuchungsmethoden der Ausgangsstoffe und an ausgewählten erhärteten Mörtelproben**

#### **5.3.1 Röntgenphasenanalyse zur quantitativen Phasenbestimmung**

Die Röntgendiffraktometrie ermöglicht eine Identifikation kristalliner Phasen. Die theoretische Grundlage hierfür ist die Beugung bzw. Reflexion von Röntgenstrahlen am Kristallgitter [12]. Die Beugungen sind von den Abständen der Netzebenen abhängig, welche bei jeder Phase unterschiedlich sind [12]. So kann man einzelne Kristalle anhand ihrer Beugungsspektren eindeutig identifizieren [12]. Da jedoch einige Phasen ähnliche bzw. überlagernde Beugungsspektren haben, ist eine eindeutige Bestimmung der Stoffe mit dieser Methode nicht möglich [12]. Die Untersuchung der Ausgangsstoffe Kaolin, Weißzement, Calibrit erfolgt mit einem Röntgendiffraktometer der Firma Philips Mod.1710. Da die Ausgangsstoffe bereits trocken und pulvrig sind, ist eine weitere Probenvorbereitung nicht notwendig. Das Pulver wird 1 mm dick auf einem runden Probenträger in den Messkreis des Gerätes eingebracht. Die Auswertung der Beugungsspektren erfolgt mit JCPDS Datenbanken. Auch wenn die ermittelten Phasen zwar bekannt sind, so kann der Gehalt der jeweiligen identifizierten Phase dennoch nur geschätzt werden.

#### **5.3.2 Lasergranulometrie**

Mit dieser Untersuchung wird die Korngrößenverteilung der Ausgangsstoffe Quarzsand H31, Kaolin, Weißzement und Calibrit bestimmt. Der verwendete Laserbeugungsanalysator Coulter LS 230 kann Korngrößenverteilungen im Bereich von 0,04 bis 2000  $\mu\text{m}$  und mit der PIDS-Technologie auch im Bereich von 0,04 bis 1  $\mu\text{m}$  messtechnisch analysieren. Das Laserlicht wird auf die Partikel gerichtet und an ihnen gebeugt. Je nach Partikelgröße entstehen charakteristische

Beugungsbilder. Die Lichtintensitäten dieser Beugungsbilder werden mit Detektoren erfasst und durch den Einsatz eines Algorithmus zusammen mit der Fraunhofer Theorie in eine Volumenverteilung umgerechnet.

### 5.3.3 Quecksilberdruckporosimetrie (MIP)

Dieses Verfahren hat das Ziel die Porengrößenverteilung einer Probe zu ermitteln.

Folgende Kenngrößen können u.a. ermittelt werden:

- offene Porosität in Vol.-%
- Gesamtporenfläche (spez. Oberfläche)
- Porenradienverteilung, Porenklassifizierung
- Reindichte.

Die Vorbereitung der Probe wird wie folgt durchgeführt. Ausgewählte Mörtelproben werden vorsichtig, möglichst ohne Risse zu erzeugen, mit einer Beißzange auf eine Korngröße von 2 bis 4 mm zerkleinert. Nach der Trocknung bei 105°C wird das Granulat in die Penetrometer eingebracht und mit einer stufenweisen Erhöhung des Druckes wird das Quecksilber in die Poren gepresst. Das Prinzip der MIP beruht darauf, dass sich Quecksilber (Hg) gegenüber den meisten Feststoffen als nicht benetzende Flüssigkeit verhält. Daher dringt es in poröse Stoffe oder zwischen die Komponenten einer Pulverschüttung nur unter Druckeinwirkung ein. Der Zusammenhang ist der folgenden Gleichung, auch WASHBURN-Gleichung genannt, zu entnehmen:

$$P = (4 * \sigma * \cos \theta) / d = (2 * \sigma * \cos \theta) / R_{\text{Hg}}^*$$

P: aufgewendeter Druck (MPa)

$\sigma$ : Oberflächenspannung des Quecksilbers ( $\sigma = 0,485 \text{ N/m}$ )

$\theta$ : Kontaktwinkel Hg - Probe ( $\theta = 141^\circ$ )

d: Durchmesser der Kapillare ( $d = 2 * R_{\text{Hg}}^*$ )

Der Radius  $R_{\text{Hg}}^*$  wird Äquivalent- oder Poreneingangsradius genannt und bezieht sich in der Regel auf Kapillaren mit zylindrischem Querschnitt. Aus o.g. Beziehung geht hervor, dass bei konstantem, gegebenen Kontaktwinkel  $\theta$  und konstanter, gegebener Oberflächenspannung  $\sigma$  der aufgewendete, äußere Druck dem Radius umgekehrt proportional ist. Bei Atmosphärendruck (0,101 MPa) sind unter

Verwendung der oben angegebenen konstanten Poren mit einem Radius von  $7,5 \mu\text{m}$  bereits mit Hg gefüllt. Um Poren mit kleinerem Äquivalentradius bestimmen zu können, muss das Probengefäß vorher evakuiert werden. Wird das bei stufenweiser Druckerhöhung von der Probe aufgenommene Hg-Volumen aufgezeichnet, lassen sich verschiedene Verteilungskurven berechnen. Die gebräuchlichste ist die Darstellung der Poreneingangs- oder Äquivalentradien als Summenkurve oder als differentielle Verteilung. Die Verteilung der Porenfläche lässt sich ebenfalls berechnen. Als diskrete Werte erhält man Gesamtporenvolumen, Gesamtporenfläche, Rohdichte und Dichte sowie einen Wert für die Gesamtporosität.

Die Gesamtporosität aus Quecksilberdruckporosimetrie-Daten stellt einen Wert für die offene, d.h. von außen zugängliche Porosität im verwendeten Druckbereich dar. Es fehlt das Porenvolumen, das durch den Fülldruck bereits zu Beginn der Messung gefüllt ist sowie die Bereiche, die mit dem Maximaldruck nicht erreicht werden können (hier: Poren  $< 3,8 \cdot 10^{-3} \mu\text{m}$ ). Diese Kenngröße wird aus den Werten für die Roh- und Reindichte berechnet und wird in Vol.-% angegeben.

Die Reindichte entspricht der Dichte nach DIN 52102, wenn am Ende der Messung alle Poren mit Hg gefüllt sind und kein geschlossener Porenraum mehr vorhanden ist.

Die Rohdichte ist infolge des bereits herrschenden Druckes der Hg-Säule etwas zu hoch bestimmt, da die Poren bis zu einem diesem Druck entsprechenden Radius bereits mit Quecksilber gefüllt sind. Da das Porenvolumen um den Betrag dieser Hohlräume zu gering bestimmt worden ist.

Die gemessenen Daten werden in einer Weise umgerechnet, dass die mittels MIP bestimmte Gesamtporosität, die eine 'offene Porosität' ist, gemäß der Einteilung basierend auf Zementstein von ROMBERG in folgende Bereiche:

> 10.000 nm	Luftporen
> 30 nm < 10.000 nm	Kapillarporen
< 30 nm	Gelporen

aufgeteilt wird.

Die Messung erfolgt mit dem Porosimeter Autopore II 9220 der Firma Micromeritics. Dieses Gerät kann Poren mit Radien von  $2,23-2,23 \cdot 10^5 \text{ nm}$  erfassen.

### **5.3.4 Rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen (REM)**

Mit der Rasterelektronenmikroskopie wird eine detaillierte Untersuchung der Bindemittelphasen oder vorhandener Pigmente durchgeführt [12]. Strukturen  $< 1\mu\text{m}$  können unterschieden werden [12]. Die einzelnen Phasen müssen anhand ihrer morphologischen Kennzeichen optisch identifiziert werden [12]. Die Interpretation erfordert viel Erfahrung und ist nicht immer eindeutig [12]. Für die Rasterelektronenmikroskopie wurde der Mörtel in ca. 1 cm große Stücke gebrochen und getrocknet. Danach erfolgte die Bedampfung der Proben mit Kohlenstoff und anschließend eine Besputterung mit Gold.

### **5.3.5 Lichtmikroskopische Untersuchung von Dünnschliffen**

Die Dünnschliffmikroskopie dient der Phasenidentifikation und bietet Einblick in das Gefüge eines Mörtels. Die mit Spezialwerkzeug gesägten und geschliffenen Proben werden in Gießharz eingebettet, auf einen Objektträger geklebt und mit einem Deckgläschen abgedeckt. Unter einem Polarisationsmikroskop erfolgt die Identifizierung der Mörtelphasen des Dünnschliffs im polarisierten als auch im Durchlicht. Die optische Auflösung der verwendeten Linsen liegt i.d.R. bei  $1\mu\text{m}$ . Die Auswertung erfolgt anhand der optischen Eigenschaften der einzelnen Komponenten. Jedoch können Bindemittelphasen in ihren Bestandteilen nicht immer zweifelsfrei identifiziert werden, da ihre Kristallitgröße unterhalb der Auflösungsgrenze liegt. Auch für diese Untersuchung ist viel Erfahrung notwendig. [12]

## **6 Versuchsergebnisse und Auswertung**

### **6.1 Eigenschaften der Marmore und Steinerfüllungsstoffe**

#### **6.1.1 Kenngrößen der Marmore**

Das Markttor von Milet besteht im wesentlichen aus zwei unterschiedlichen Marmoren. Der mittelkörnige Marmor (Probe 32) weist einen bimodalen Mineralgehalt auf. Neben Calcit kommt Dolomit in dünnen Lagen vor. Der reine Calcitmarmor (Probe 68) ist grobkörnig und zeigt keine Inhomogenitäten. Die Proben besitzen vergleichbare Gesamtporositäten von 0,83 % unterscheiden sich allerdings in den Porengrößen. Die Porenradienverteilung des mittelkörnigen Marmors ist im Vergleich zum reinen Calcitmarmor zu kleineren Porenradien (unterer Bereich der Kapillarporen) verschoben (vgl. A 4). Der grobkörnige Marmor zeigt im Gegensatz zum mittelkörnigen Marmor erkennbare Korngrenzenentfestigungen.

Des weiteren unterscheiden sich die beiden Proben in ihren Druckfestigkeiten und E-Modulen (vgl. A 4). [13]

mittelkörniger Marmor (Probe 32):

- Druckfestigkeit: 95 N/mm<sup>2</sup>
- dyn. E-Modul: 54,3 KN/mm<sup>2</sup>

grobkörniger Marmor (Probe 68):

- Druckfestigkeit: 59 N/mm<sup>2</sup>
- dyn. E-Modul: 42,9 KN/mm<sup>2</sup>

### 6.1.2 Übersicht über die Steinerfüllungsstoffe

Bisher ist noch nicht geklärt, ob die alten Mörtel in den Säulen völlig entfernt werden können. Aus diesem Grund kann nach der vollständigen Analyse der vorhandenen Mörtel, die momentan von der Universität Göttingen durchgeführt wird, eine Prüfung der Verträglichkeit der Mörtel im Bestand mit dem entwickelten Mörtel notwendig werden.

Folgende Beispiele geben eine Auswahl der vorhandenen Mörtel des Markttors. Es handelt sich um Zement- und Kalkmörtel sowie verschiedene Ziegelbestandteile. In einigen der zementgebundenen Mörtel treten Ettringitkristalle auf, diese geben indirekte Hinweise, auf die Zugabe von Sulfatträger wie z.B. Gips, die im Zusammenhang mit der Zerstörung im zweiten Weltkrieg gelöst wurden und vermutlich die sekundäre Ettringitbildung hervorgerufen haben.

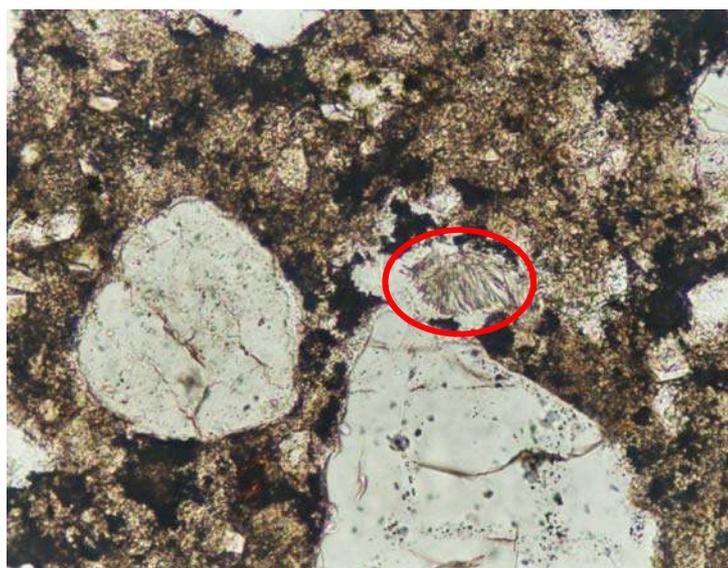


Abb.8: Probe 1/4 Durchlicht Bildbreite: 0,79 mm

Der Zementmörtel hat einen guten Verbund zum Zuschlag. Neben Belitnestern ist auch eine Ettringitbildung (roter Kreis) erkennbar. Der Ettringit ist mit der Röntgenanalyse aufgrund der geringen Mengen nicht eindeutig identifizierbar. [14]

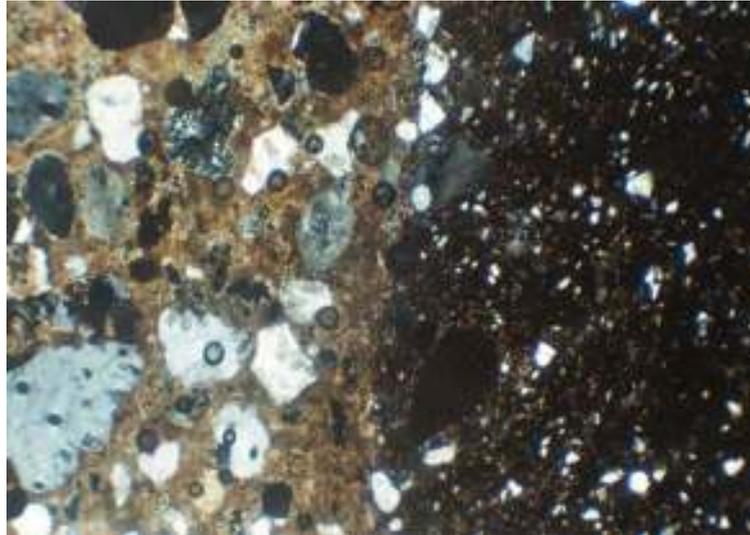


Abb.9: Probe 4/2 Durchlicht Bildbreite: 0,79 mm

In Abb.9 ist der Übergang von Kalkmörtel (links) zum Ziegel (rechts) sichtbar.[14]

## 6.2 Charakterisierung der Ausgangsstoffe

### 6.2.1 Weißzement CEM I 52,5 N (sw)

Weißzement ist dadurch charakterisiert, dass er kein oder kaum  $C_2(A, F)$  enthält. Der Anteil des  $C_3A$  ist allerdings höher als im normalen Portlandzement. Die Röntgenanalyse des Zementes (vgl. A 12) weist die gleichen Phasen wie Abb.10 auf. Als sonstige Stoffe sind die Sulfatträger Gips und Anhydrit enthalten, welche den Erhärtungsprozess des Zementes steuern. Durch den geringen Eisenanteil ( $<0,5\% \text{ Fe}_2\text{O}_3$ ) wird der hohe Weißgrad erzielt. Der hohe  $C_3S$ -Anteil und der Silikatmodul bewirken eine schnelle und hohe Festigkeitsentwicklung. Die enggestufte Körnungsverteilung des Zementes hat eine mittlere Partikelgröße von  $38,4 \mu\text{m}$  (A 13). Die Vorteile des Weißzementes sind:

- hohe Festigkeit und schnelle Festigkeitsentwicklung
- hoher Weißgrad
- normale Hydratationswärme und Nacherhärtung
- hohe Feinheit [15]

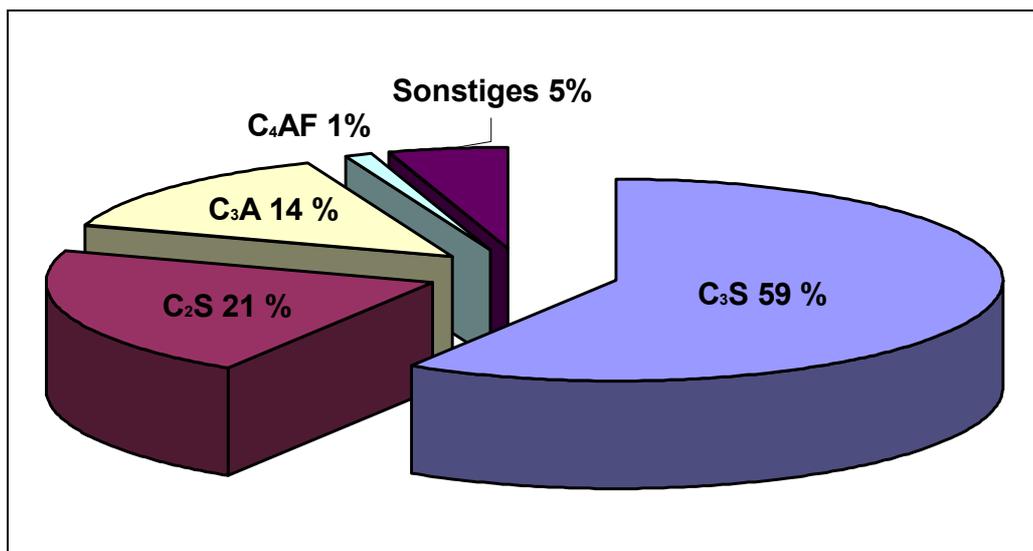


Abb.10: Anteile der Phasen im Weißzement CEM I 52,5 N (sw) der Firma Dyckerhoff [16]

### 6.2.2 Calciniertes Kaolin Metastar 501

Das Metastar 501 entsteht aus natürlich vorkommendem Kaolin (china clay). Durch die Calcinierung wird das Kaolin einer stufenweisen Phasenänderung unterzogen, wobei die Kaolinite ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) zu amorphen Phasen den sogenannten „Metakaoliniten“ ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ) umgewandelt werden [17]. Das Puzzolan Metakaolin reagiert mit dem Calciumhydroxid aus der Zementhydratation zu festigkeitsbildenden CSH-Phasen, Calciumaluminathydraten und Aluminatsilikathydratphasen [15]. Mit der Röntgenanalyse können Alkalifeldspäte (Orthoklas, Mikroklin) und Glimmer (Muscovit, Illit), aber keine amorphen Strukturen wie die der Metakaolinite identifiziert werden (vgl. A 14). Aus der enggestuften Korngrößenverteilung ergibt sich eine mittlere Partikelgröße von  $7,6 \mu\text{m}$  (A 15).

Die Vorteile des Metakaolins sind:

- hohe puzzolanische Reaktivität
- geringe Dichte
- hohe Feinheit
- hoher Weißgrad [17]

### 6.2.3 Kalksteinmehl Calibrit

Der Rohstoff für Calibrit ist ein weisser, massiger Kalkstein biogenen Ursprungs [18]. Wie aus dem Röntgenogramm (A 16) hervorgeht, besteht dieses Kalksteinmehl vorwiegend aus Calcit und geringen Mengen Quarz. Der Mittelwert der enggestuften Partikelverteilung liegt bei  $36,7 \mu\text{m}$ .

Die Vorteile des Calibrits sind:

- hohe Reinheit
- hoher Weißgrad
- stoffkompatibel zum Marmor, da Calciumcarbonat

#### **6.2.4 Quarzsand H 31**

Der Quarzsand H 31 besteht aus  $\text{SiO}_2$ . Es handelt sich bei H 31 um einen phasenrein aufgemahlenden Quarz.

Vorteile des Quarzsandes H 31 sind:

- hohe chemische Reinheit (99,8%  $\text{SiO}_2$ )
- hohe mechanische Festigkeit
- hohe Feuer- und Säurebeständigkeit [19]

Der Mittelwert der Korngrößenverteilung beträgt 454,6  $\mu\text{m}$  (A 17).

#### **6.2.5 Sonstige Zusatzstoffe**

Kieselgur oder auch Diatomeenerde genannt besteht hauptsächlich aus wassergebundener Kieselsäure und einem geringen Anteil Quarz (A 19). Kieselgur reagiert puzzolanisch wie Metakaolin. Zudem besitzt dieser Stoff einen ähnlichen Weißgrad.

Omyacarb 2 BG ist ein mit Calibrit vergleichbares Kalksteinmehl. Die Körnungsverteilung des Omyacarb 2 BG ist mit einer mittleren Partikelgröße von 2  $\mu\text{m}$  wesentlich feiner als die des Calibrits.

#### **6.2.6 Zusatzmittel**

Das farblose Fließmittel Redoment wird auf Melaminharzbasis hergestellt [20]. Fließmittel bewirken eine erhebliche Verminderung des Wasseranspruchs und verbessern die Verarbeitbarkeit. Die Melaminharze besitzen eine gute Wirksamkeit, welche auf der elektrostatischen Abstoßung der Zementteilchen beruht. Jedoch ist die Wirkungsdauer begrenzt, da im Verlaufe der Hydratation die Zementteilchen mehr und mehr von den Hydratationsprodukten umhüllt werden. Die Abstoßung ist nicht mehr gewährleistet und führt so zum Konsistenzverlust [21,22]. Ein Nachteil des Fließmittel kann die geringfügige Erzeugung von Luftporen sein [23].

Die Luftporenbildner erzeugen kleine kugelige Luftporen mit einem Durchmesser unter 0,3 mm. Sie werden meist zur Erhöhung des Widerstandes von Betonen gegen Frost- und Tauwechsel eingesetzt. Diese Kugelporen bleiben mit Luft gefüllt und steigern die Porosität des Gefüges ohne negativen Einfluss auf den Wasserhaushalt, da sie keine Verbindung nach außen besitzen. Durch Erhöhung der Porosität wird die Dichte reduziert. Außerdem verbessern Luftporenbildner die Verarbeitbarkeit und vermindern den Wasseranspruch, da sie gewissermaßen wie kleine Kugellager wirken. [23]

In Kapitel 3.2 verwendete Luftporenbildner:

- LP 20 (flüssig)
- MMO (flüssig) (eine spezielle Eignungsprüfung ist für dieses Mittel erforderlich!)
- Mikrohohlgaskugeln (fest)

Auf die Beschreibung der Wirkungsweise des Fließmittels Woerement wird an dieser Stelle verzichtet. Bereits nach einem durchgeführten Test zeigt sich, dass dieses Fließmittel für weitere Versuche nicht geeignet erscheint (vgl. Testreihe 6).

### **6.3 Die Resultate der Testreihen**

Ziel der Testreihen ist die Beurteilung der verschiedenen Zusatzstoffe und –mittel hinsichtlich der Eignung für die Mörtelentwicklung.

#### **6.3.1 Ergebnis der Testreihe 1**

Ziel der Testreihe 1 ist die Senkung des Wasseranspruchs und der Dichte. Um die Dichte zu minimieren, werden verschiedene Luftporenbildner eingesetzt und zur Reduktion des Wasseranspruchs wird das Fließmittel Redoment zugegeben (vgl. A 7). Aus Tab.3 wird ersichtlich, dass bei annähernd gleichem Ausbreitmaß die flüssigen Luftporenbildner LP 20 und MMO sowie das Fließmittel Redoment den w/b-Wert reduzieren. Im Gegensatz hierzu erhöhen die Mikrohohlgaskugeln den w/b-Wert.

Die wasserreduzierende Wirkung (vgl. Kapitel 6.2.6) der Luftporenbildner gilt scheinbar nur für flüssige Luftporenbildner.

### 6.3.2 Ergebnis der Testreihe 2

In der Testreihe 2 soll ein w/b-Wert von 0,4 erreicht werden, um den Wassergehalt weiter zu senken. Die Steigerung des Fließmittelgehaltes dient der Konsistenzverbesserung. Mit der Zugabe eines flüssigen Luftporenbildners als Zusatzmittel kann der Gehalt des Fließmittels reduziert werden, da die verflüssigende Wirkung der Luftporenbildner zur Reduktion des Wasseranspruchs beiträgt. Die Mikrohohlglaskugeln haben keinen Einfluss auf die Konsistenz, d.h. die Kugellagerwirkung von Luftporenbildnern, die in Kapitel 6.2.6 beschrieben wird, trifft auf die MHG scheinbar nicht zu, da in Testreihe 1 und 2 keine verflüssigende Wirkung der Mikrohohlglaskugeln festzustellen ist.

### 6.3.3 Ergebnis der Testreihe 3

Zum Vergleich der Wirksamkeiten der verschiedenen Luftporenbildner werden in dieser Testreihe Luftporengehalte und Dichten ermittelt. In Abb.11 werden die Luftporengehalte mit den Dichten korreliert. Hierbei wird deutlich, dass die Erhöhung des Luftporengehaltes, wie nicht anders zu erwarten war, zur Reduktion der Dichte führt. Mit dem Mörtelzusatzmittel (MMO) wird der maximale LP-Gehalt von 19,5% und somit die geringste Dichte erreicht. Da dieses Mittel nur in geringen Mengen dosiert werden darf, reagiert es empfindlich auf leichte Veränderungen des Wassergehaltes. Zudem bewirkt die hohe Porosität einen beträchtlichen Festigkeitsverlust. Aus diesen Gründen werden keine weiteren Proben mit MMO erstellt. Die Mikrohohlglaskugeln (MHG) verändern weder den Luftporengehalt noch die Dichte merklich. Der Luftporengehalt des LP 20 liegt bei 9,5% und die Dichte wird um ca.  $0,16 \text{ g/cm}^3$  gesenkt (vgl. FM mit FM+LP 20).

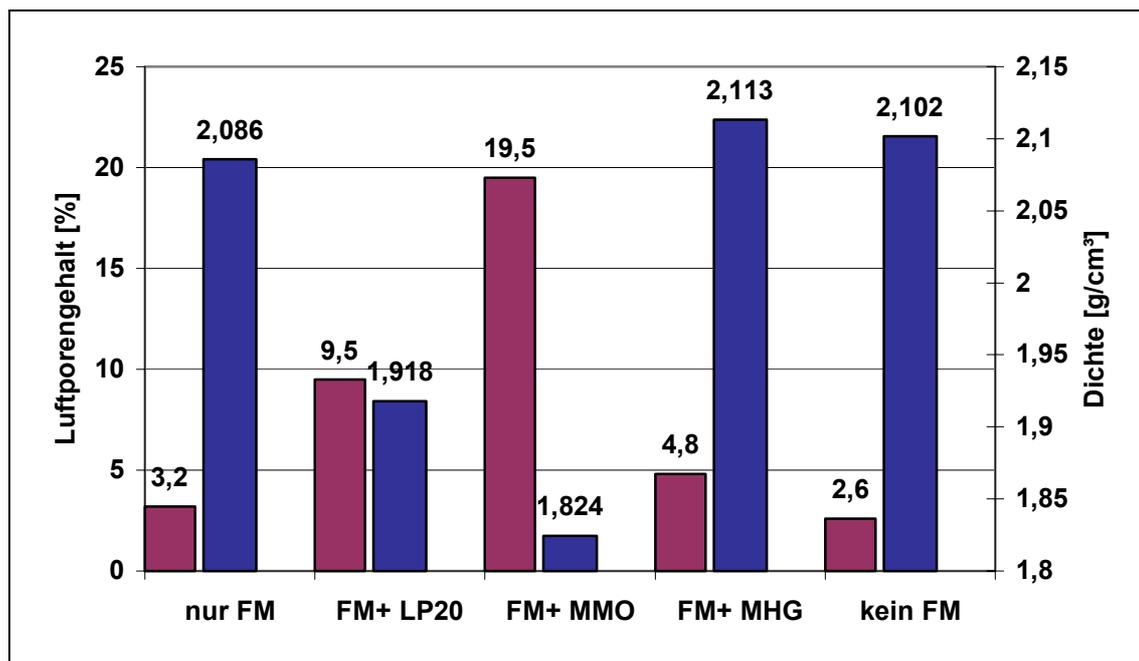


Abb.11:Luftporengehalte und Dichten der Mischung M 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin mit verschiedenen Zusatzmitteln

#### 6.3.4 Ergebnis der Testreihe 4

Ziel dieser Testreihe ist die Auswahl eines Kalksteinmehles in einem geeigneten Verhältnis zur Optimierung der Packungsdichte des Mörtels.

Aus Abb.12 wird die porige, grobe Mörteloberfläche beim Einsatz des Quarzsandes ohne Kalksteinmehl ersichtlich. Durch die Zugabe des Kalksteinmehles Calibrit ergibt sich eine feinere Struktur der Oberfläche (vgl. Abb.11). Das Kalksteinmehl Calibrit hat einen um ca. 18% geringeren Wasseranspruch als Omyacarb 2BG. Die Ursache des gesteigerten Wasseranspruchs ist durch die höhere Feinheit von Omyacarb 2 BG zu erklären (vgl. A 20 mit A 17). Je feiner ein Stoff gemahlen worden ist, desto mehr Oberfläche entsteht, die mit Wasser benetzt werden muss. Daraus resultiert bei gleicher Frischmörtelkonsistenz ein höheres w/b-Verhältnis. Das Verhältnis von Calibrit/H31 wurde auf 1/1,5 angepasst, da bei diesem Mischungsverhältnis nach augenscheinlichen Betrachtungen eine hohe Packungsdichte erreicht wird.



Abb. 12: M 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin, Zuschlag:H31



Abb.13: :M 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin,  
Zuschlag: Calbrit/H31: (1/1,5)

### 6.3.5 Ergebnis der Testreihe 5

Die Mischungen M 1:2 und M1:3 mit 20 Gew.-% Kaolin werden mit verschiedenen Betonzusatzmittelkombinationen hergestellt. Für ein Bewertung der Mörtel Eigenschaften werden die Druckfestigkeiten sowie die E-Moduli nach 7 Tagen ermittelt. Die dynamischen E-Moduli und die Druckfestigkeiten lassen sich ansatzweise korrelieren wie aus Abb.14 ersichtlich ist. Die maximal erreichten dynamischen E-Moduli betragen  $32,0 \text{ KN/mm}^2$ . Infolge des reduzierten Zementgehaltes der Mischungen M 3.1-M 3.4 ergeben sich geringere Festigkeiten und E-Moduli als für die Zusammensetzungen M 2.1-M 2.4. Die Differenz der vergleichbaren Mischungen mit Betonzusatzmitteln liegt konstant bei Druckfestigkeiten von ca.  $14 \text{ N/mm}^2$ . Die Mikrohohlglaskugeln als weiterer Mischungsbestandteil verringert die Festigkeit um ca. 10% gegenüber den Fließmittelproben (M 2.1, M 3.1). Durch den Einsatz des Fließmittels wird die Druckfestigkeit nahe zu verdoppelt (vgl. M 2.1 mit M 2.4; M 3.1 mit M 3.4). Die Zugabe des Luftporenbildners bewirkt eine Reduzierung der Druckfestigkeiten um ca. 33 % (vgl. M 2.1-M 2.2, M 3.1-M. 3.2).

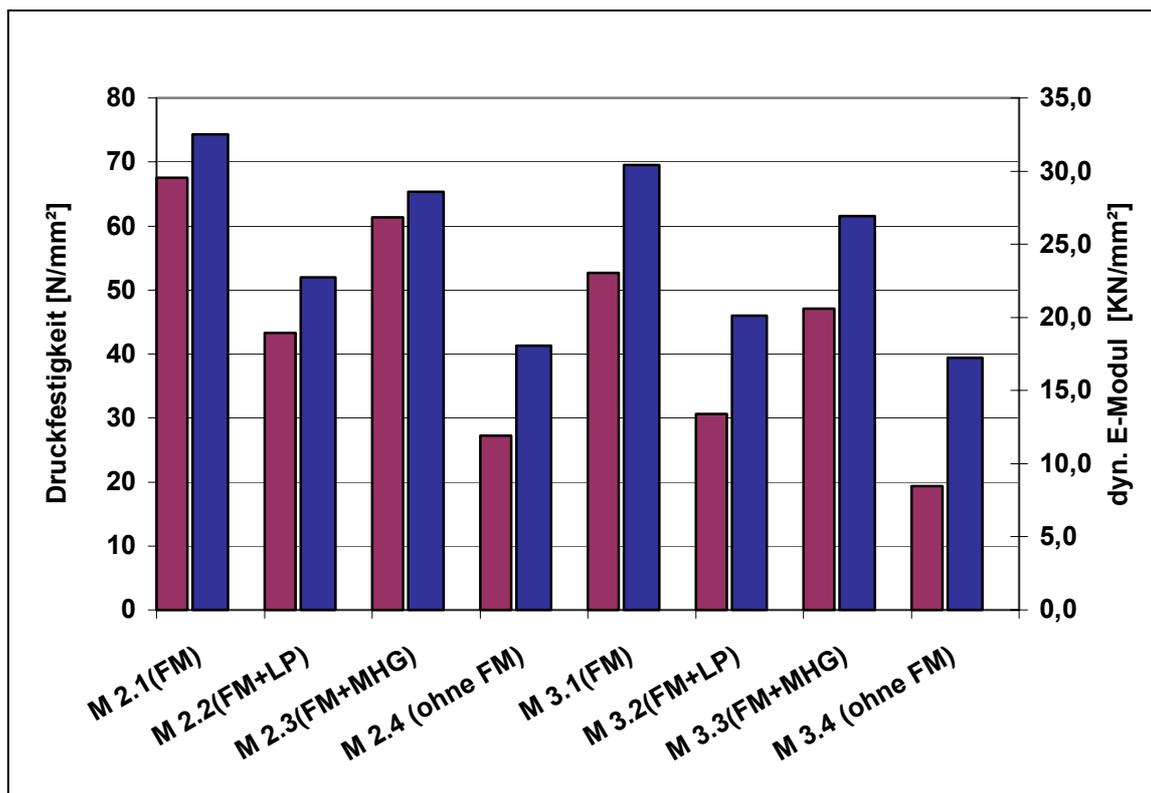


Abb.14: Druckfestigkeiten und E-Module der Mischungen M 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin (M 2.1-M 2.4) und M 1:3 mit 20 Gew.-% Kaolin (M 3.1-M 3.4) mit verschiedener Zusatzmitteln

### 6.3.6 Ergebnis der Testreihe 6

Zum Vergleich wurde die Mischung 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin mit einem zweiten Fließmittel -Woerement FM794- getestet. Obwohl diese sehr zäh und somit schwer verarbeitbar war, konnte eine gewisse Fließfähigkeit beobachtet werden. Das braune Fließmittel verfärbte in geringem Maße den Frischmörtel. Aufgrund dieser Eigenschaften wird es nicht weiter verwendet und die damit hergestellten Proben nicht näher untersucht.

### 6.3.7 Ergebnis der Testreihe 7

Nach der Zerstörung aller bewehrten Prismen (A 10) wurde im Bereich der Auflager eine Stahlkorrosion sichtbar (Abb.15 roter Pfeil). Die Ursache der Zersetzung ist wahrscheinlich die Luftdurchlässigkeit des provisorischen Abstandshalter für Bewehrungsstäbe, da an den Bereichen zwischen den Auflagern keine Korrosionsschäden verzeichnet werden konnten. Der Phenolphthaleintest zeigt, dass der Mörtel im Inneren alkalisch ist und somit dem Stahl Korrosionsschutz bietet. Nach 90 Tagen Lagerung bei einer Temperatur von  $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $(60 \pm 5)\%$  beträgt die Carbonatisierungstiefe ca. 5 mm (vgl. Abb. 16). Da der Mörtel in die Säulen gegossen

werden soll und der Marmor eine geringe Porosität besitzt, ist die Luftzufuhr stark eingeschränkt, so dass eine Carbonatisierung in dem Ausmaß nicht stattfinden kann. Abgesehen davon kann man auch bei diesem kulturhistorisch außerordentlich wertvollem Bauwerk notfalls legierte Edelstähle verwenden.



Abb.15: Korrosion am Stahl der Probe M 5.20  
infolge fehlerhafter Auflagerkonstruktion



Abb.16: Phenolphthaleintest der Probe M 4.20

#### 6.4 Zusammenfassung und Bewertung der Testreihen 1-7

Die Testreihen 1 und 2 zeigen, dass die Luftporenbildner LP 20 und MMO eine verflüssigende Wirkung besitzen. Im Gegensatz dazu erhöhen die Mikrohohlglaskugeln (MHG), den erforderlichen Wasseranspruch, führen aber zu keiner nennenswerten Reduktion der Dichte (Tab. 5). Des weiteren neigen die MHG wie auch das Kieselgur nach augenscheinlichen Betrachtungen zum Bluten. Die Kieselgurproben werden in den Testreihen nicht näher aufgeführt, da der Wasseranspruch dieser Proben höher und die Festigkeiten niedriger sind als bei vergleichbaren Tests mit Kaolin (vgl. A 5). Das Mörtelzusatzmittel (MMO) wird nicht verwendet, da Luftporen in großen Mengen gleichzeitig eine erhebliche Reduktion der Festigkeit bewirken (vgl. Abb.14). Das Fließmittel Woerement FM794 ist für den gewünschten Mörtel durch die nachteiligen Auswirkungen auf die Konsistenz und die Frischmörtelfarbe nicht geeignet (vgl. Kapitel 6.3.6). Aus den Ergebnissen der Testreihe 7 geht hervor, dass der Mörtel an sich für den Verbund mit Stahl geeignet ist. Die Carbonatisierung, wie auf Abb.16 deutlich wird, ist bereits weit fortgeschritten. Da der Mörtel innerhalb der Stützen eingebracht wird und nur in geringem Maße mit Luft ( $\text{CO}_2$ ) in Verbindung kommt, wird sich der Carbonatisierungsprozess erheblich verlangsamen.

Neben den Bindemittel/Zuschlagverhältnis 1/2 und 1/3 wird in den folgenden ausgewählten Mischungen auch das b/z-Verhältnissen von 1/4 berücksichtigt, um eine breite Anzahl an Proben mit unterschiedlichen Eigenschaften insbesondere hinsichtlich der Festigkeiten zu erzeugen.

## **6.5 Ergebnisse der Frischmörteltests an ausgewählten Mischungen**

### **6.5.1 Beobachtungen bei der Einstellung des Ausbreitmaßes**

Das Ausbreitmaß nach DIN EN 1015 aller gewählter Mischungen wird auf 24-25 cm festgelegt (vgl. Tab.7), um das Vergießen des Mörtels zur Herstellung von Prismenformen ohne Verdichtung zu ermöglichen. Nach der Optimierung des Fließmittels Redoment stellt sich beim Vergleich der w/b-Werte der Fließmittelmischungen mit den Kombinationen von FM und LP 20 heraus, dass die Luftporenbildner im Unterschied zu den Testreihen keine verflüssigende Wirkung mehr besitzen. Im Gegenteil der Wasseranspruch erhöht sich zum Teil sogar leicht. Möglicherweise sind die beiden Zusatzmittel erst nicht vollständig miteinander mischbar und kompatibel. Diese Frage kann erst über eine exakte chemische Analyse des Fließmittels und des Luftporenbildners geklärt werden. Infolge der Volumenvergrößerung der Mischungen mit LP 20 wird die Fließfähigkeit herabgesetzt. Aufgrund des gesteigerten Wassergehaltes kommt es zum Bluten der Zusammensetzungen ohne Zusatzmittel.

### **6.5.2 Die Verarbeitungszeit**

Die Ermittlung der Verarbeitungszeit erfolgte an drei Favoritenmischungen. Diese werden in Kapitel 6.8 näher erläutert. Die experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass sich diese Zusammensetzungen bis zu 20 Minuten nach Beendigung der Mischzeit einbauen lassen (vgl. A 21).

### **6.5.3 Luftporengehalte**

Der Luftporengehalt aller Fließmittelproben liegt bei ca. 3%. Die Mischungen ohne Zusatzmittel haben Luftporengehalte unter 1%. Anhand dieser Zahlen wird deutlich, dass auch das Fließmittel in geringem Maße Luftporen ausbildet (vgl. Kapitel 6.2.6). Obwohl allen Kombinationsmischungen von FM und LP anteilig die gleiche Menge des Luftporenbildners zugegeben wird, zeigen sich in den Luftporengehalten wesentliche Unterschiede. Insbesondere M 1:2 20 FLP besitzt einen extrem hohen Luftporengehalt von 22%. Alle anderen Kombinationsmischungen weisen Werte von 10-15% auf, wobei das Minimum von 10,5 % der Mischung M1:2 30 FLP vorbehalten ist. Die Begründung für das Verhalten von M 1:2 20 FLP kann möglicherweise mit der Inkompatibilität des FM mit dem Luftporenbildner in Zusammenhang stehen. Setzt man die w/b-Werte der Fließmittelmischungen mit

denen der vergleichbaren Kombinationszusammensetzungen ins Verhältnis, so ergibt sich für die Mischung M1:2 20 FLP der mit Abstand höchste Wasseranspruch (A 21). D.h. die Proben mit Luftporenbildner benötigen mehr Wasser, obwohl laut Herstellerangaben der Luftporenbildner doch eigentlich verflüssigend wirken soll. Wovon die Bildung der Luftporen unter Beteiligung des LP 20 und FM abhängig ist, kann aus den bisherigen Untersuchungen nicht abgeleitet werden.

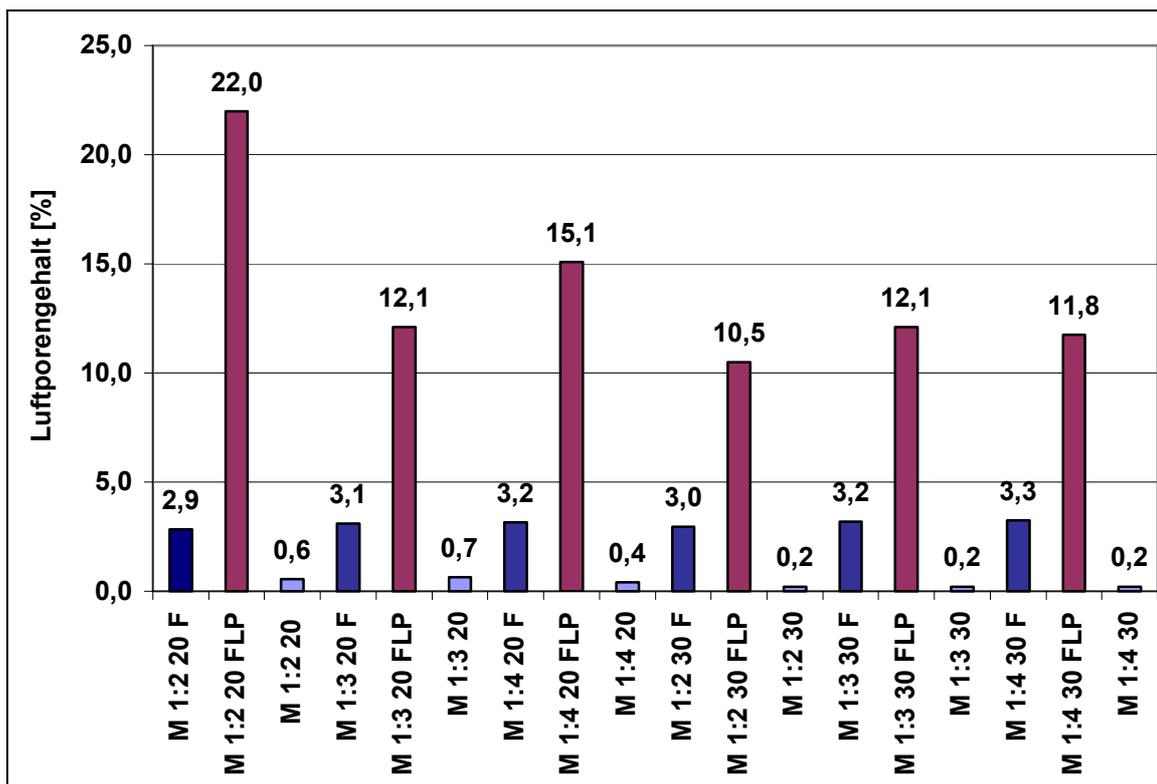


Abb. 17: Luftporengehalte der gewählten Mischungen

#### 6.5.4 Das Wasserrückhaltevermögen

Das Wasserrückhaltevermögen (WRV) der FM- und Kombinationsmischungen beträgt 98-99%. Die Proben ohne Betonzusatzmittel ( $w/b$ -Werte  $>0,96$ ) besitzen aufgrund der Menge an ungebundenem Wasser im Mörtelgefüge somit geringere Wasserrückhaltevermögen (92-96%) als jene Mischungen mit niedrigeren Wasseransprüchen.

## 6.6 Ergebnisse der Festmörteluntersuchungen

### 6.6.1 Druck- und Biegezugfestigkeiten

Die Druckfestigkeitsentwicklung der Prismen mit Fließmittel und Luftporenbildner (Abb.18) zeigt, dass die Proben mit 20 Gew.-% Kaolin trotz des höheren Zementgehaltes geringere Festigkeiten als die Mischungen mit 30 Gew.-% Kaolin

aufweisen. Der Vergleich der Druckfestigkeiten mit den Luftporengehalten verdeutlicht den Einfluss der Porosität auf die Festigkeit. Je höher der Luftporengehalt und je niedriger der Zementgehalt desto geringer sind die Festigkeiten (vgl. Abb.18 mit Abb.17)

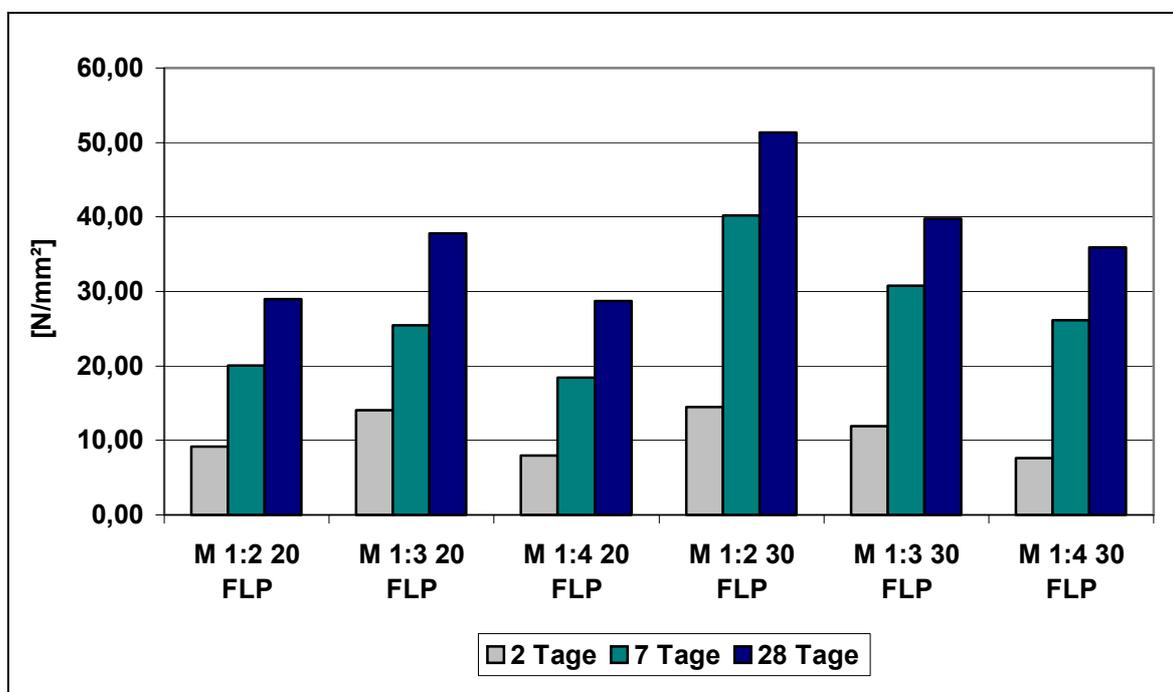


Abb. 18: Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit Fließmittel und Luftporenbildner

Infolge des geringen Luftporengehaltes von ca. 3% weisen die Mischungen mit Fließmittel weit aus höhere Festigkeiten auf als die vergleichbaren Proben mit FM und LP (10-22% Luftporengehalt) (vgl. Abb.18 mit Abb.19). Die Unterschiede der Festigkeiten insbesondere der Mischungen mit 20 Gew.-% Kaolin aus Abb.16 sind vornehmlich auf die unterschiedlichen Porositäten infolge des Luftporengehaltes zurückzuführen. An den Mischungen mit LP und FM mit 30% Kaolin lässt sich jedoch der Einfluss des Zementgehaltes auf die Festigkeit ableiten, da die Unterschiede in den Luftporengehalten nur 1-2% betragen. Es gilt je höher der Zementgehalt ist desto höher sind die Festigkeiten. Über den Einfluss des Kaolins auf die Festigkeiten kann nach Abb.18 keine Aussage getroffen werden, da der Einfluss der Porosität bei den Mischungen mit FM und LP eine maßgebende Einflussgröße darstellt. Die Biegezugfestigkeiten der Fließmittel und Kombinationsmischungen liegen nach 28 Tagen zwischen 3-5 N/mm². Die Proben ohne Betonzusatzmittel weisen infolge der (w/b-Werte >0,96) nur Biegezugfestigkeiten von 0,9-2,9 N/mm².

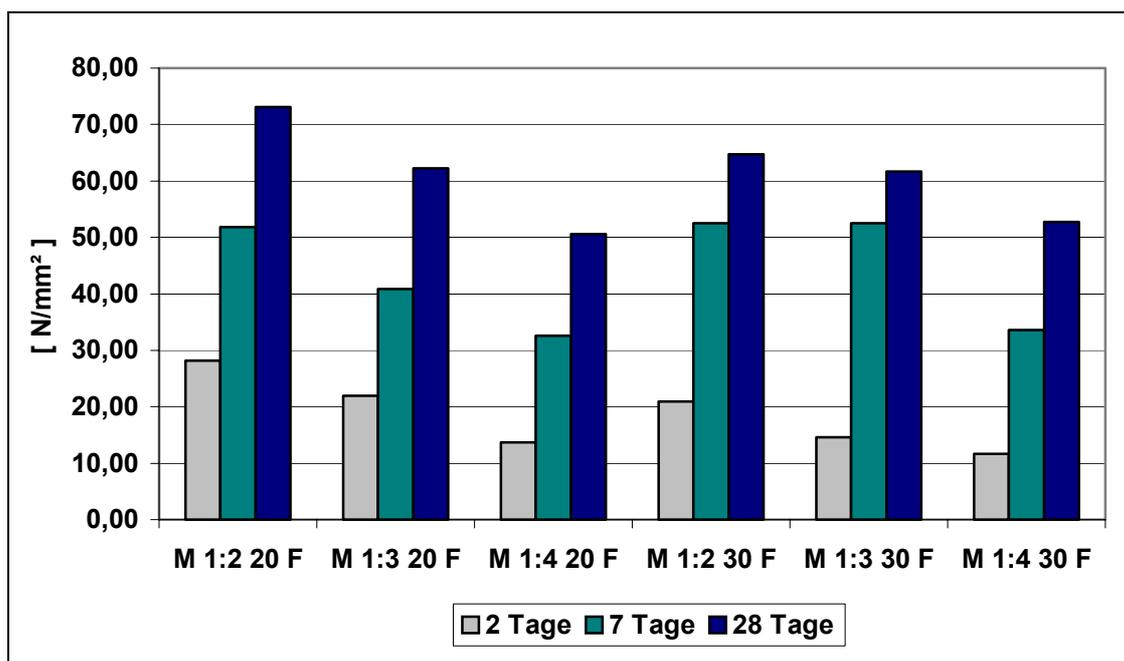


Abb. 19: Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit Fließmittel

In Abb.19 zeigt sich, dass sowohl der Zementgehalt als auch der Kaolingehalt die Festigkeiten beeinflussen. Durch den erhöhten Kaolingehalt wird der Zementgehalt reduziert und die festigkeitsbildenden CSH-Phasen des Kaolins können den fehlenden Zement nicht ersetzen, hieraus folgt, dass die Festigkeit mit steigendem Kaolingehalt sinkt (vgl. z.B. 1:2 20 F mit 1:2 30 F). Aber vergleicht man M 1:4 20 F mit M 1:4 30 F, so kann diese Theorie nicht bestätigt werden, da die Mischung mit 30 Gew.-% Kaolin eine höhere Festigkeit besitzt. In der Forschung sind die Ergebnisse über die Aktivität von Kaolin bezüglich der Festigkeits- sowie der Calciumhydroxidentwicklung in der Erhärtungszeit des Zementes noch nicht so weit vorangeschritten, als dass sie auf die hier beobachteten Phänomene angewendet werden könnten.

### 6.6.2 Dynamischer E-Modul

Der dynamische E-Modul beschreibt die Steifigkeit eines Mörtels. Aus diesem Grund verdeutlicht ein Vergleich der Druckfestigkeiten mit den E-Moduli, dass Größen wie Zementgehalt, Wasseranspruch und Porosität den E-Modul und die Druckfestigkeit gleichermaßen beeinflussen (vgl. Abb.20).

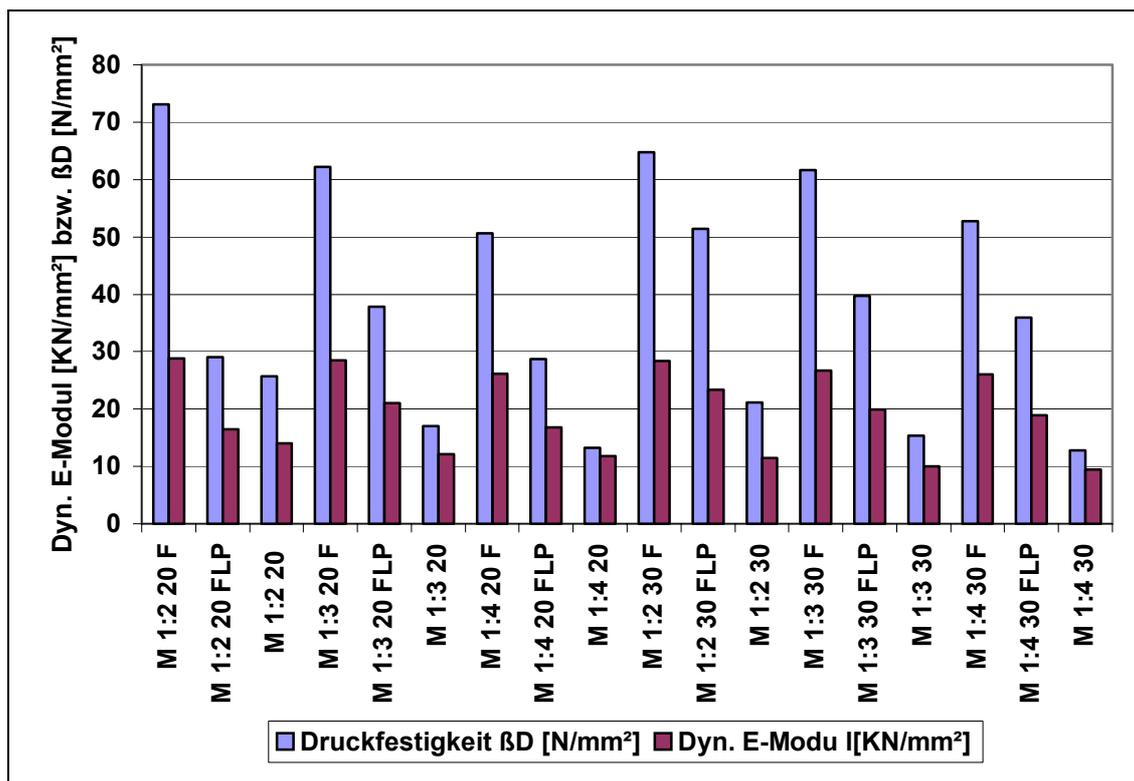


Abb. 20: Druckfestigkeiten und E-Moduli aller Mischungen nach 28 Tagen

Die Mischungen mit den höchsten Druckfestigkeiten besitzen auch die größten Steifigkeiten und somit auch den höheren E-Modul und die Mischungen mit den geringsten Festigkeiten haben auch die niedrigsten E-Moduli. (vgl. z.B. M 1:2 20 F mit M 1:2 20). Die Fließmittelmischung haben die höchsten E-Moduli, diese liegen zwischen 28 und 26 KN/mm<sup>2</sup>.

### 6.6.3 Quellen und Schwinden

Unter Schwinden versteht man die Volumenabnahme durch Feuchtigkeitsabgabe während des Abbindens. Das Schwinden von Zementstein kann gesteigert werden durch:

- Erhöhung des Zementgehaltes
- zunehmendem w/b Wert
- steigender Porosität

Zudem beeinflussen die Lagerungsbedingungen, die Feinheit des Zementes und andere Kenngrößen das Schwindmaß.[15] Diese Werte werden jedoch in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da nur ein Zement verwendet wird und die Lagerungsbedingungen identisch sind. Aus der Abb.21 wird deutlich, dass die Schwindmaße der Fließmittelproben unabhängig vom b/z-Verhältnis geringer sind als die der

vergleichbaren Mischungen mit FM und LP oder diejenigen ohne Zusatzmittel. Aber für alle Mischungen gilt; je geringer der Zementgehalt desto kleiner ist das Schwindmaß, da das Schwinden hauptsächlich auf den Zementstein zurückzuführen ist. Die Zusammensetzungen ohne Zusatzmittel mit w/b-Werten  $> 0,96$  besitzen einen verstärkt ausgebildeten und vernetzten Kapillarporenraum. Die Verdunstung des Wassers in den Kapillarporen ruft Kompressionen hervor, d.h. der Zementstein schwindet. Die Bildung durchgehender Kapillarporen im Zementstein ist erst ab w/b-Werten  $> 0,5$  von Bedeutung [15]. Die höheren Schwindmaße der Mischungen mit FM und LP sind auf die gesteigerte Porosität zurückzuführen (vgl. Kapitel 6.7.1). Nach ca. 8 Tagen nehmen die Veränderungen des Schwindmaßes ab (vgl. A 63- A 64). Die geringsten Schwindwerte haben die Mischungen M 1:4 20 F und M 1:4 30 F bedingt durch die reduzierten Zementgehalte.

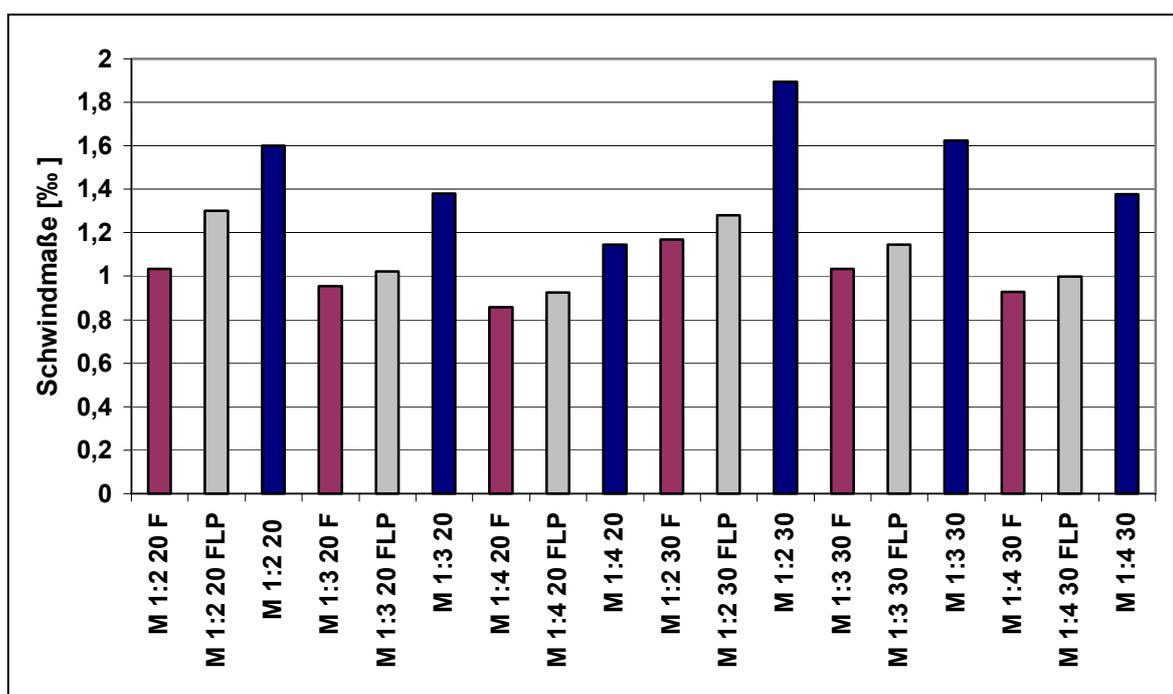


Abb. 21: Schwindmaße in [%] aller Mischungen nach 18 Tagen

#### 6.6.4 Ungebundene CaO-Gehalte

Die CaO- bzw.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalten der einzelnen Zusatzmittelkombinationen mit gleichen Bindemittel/Zuschlagverhältnissen unterscheiden sich kaum (vgl. A 65- A 67). Nach 28 Tagen liegt der Anteil des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  der Bindemittelverhältnisse mit 20 Gew.-% Kaolin zwischen 1,78-1,57% und mit 30 Gew.-% Kaolin bei 1,31-1,14%. Diese Unterschiede lassen sich mit der Reaktivität des Puzzolans erklären. Das Metakaolinit reagiert mit Calciumhydroxid aus der Zementhydratation zu

Calciumsilikathydraten und anderen Hydratphasen. Je größer der Anteil des Kaolins bei konstantem Zementgehalt ist, desto mehr Calciumhydroxid wird gebunden und kann in der Mischung nachgewiesen werden. Wie schon angesprochen wird momentan das Verhalten des Metakaolins hinsichtlich der puzzolanischen Reaktivität wissenschaftlich untersucht. Aus mehreren Versuchsreihen mit Portlandzementen [25] geht hervor, dass nach 14 Tagen der  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehalt auf ein Minimum unabhängig vom Kaolingehalt sinkt und später wieder ansteigt. Es sollte berücksichtigt werden, dass auch bei den untersuchten Mörtelproben eine Reduktion unter die in Abb.22 angegebenen Werte möglich wäre, die aufgrund der kurzen Bearbeitungszeit nicht messbar war.

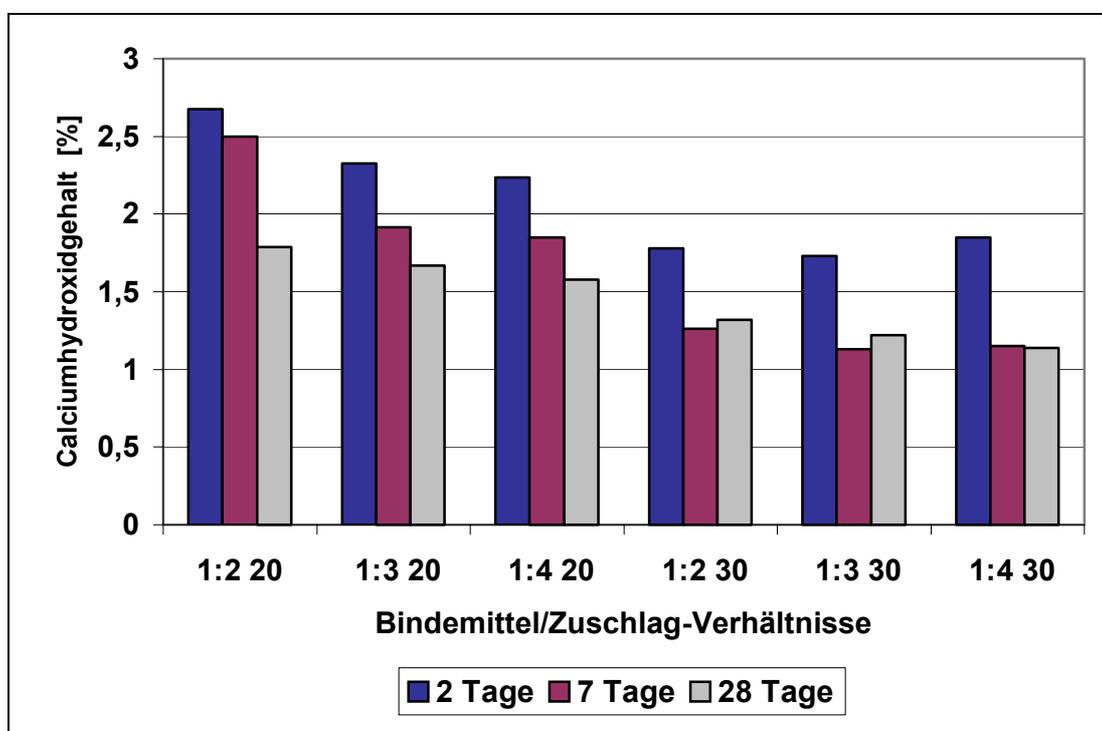


Abb. 22: Calciumhydroxidgehalte der verschiedenen Bindemittel/Zuschlagverhältnisse

Beim Vergleich der Calciumhydroxidgehalte der Ausgangsmischungen (A 5) mit den Ergebnissen (Abb. 22) kann durch den Einsatz der Zusatzmittel eine Verbesserung der puzzolanischen Reaktivität festgestellt werden. Die w/b-Werte der Fließmittelmischungen und der Kombinationen FM mit LP differieren nicht deutlich mit denen der Ausgangsmischungen. Das Zusatzmittel erhöht den Wassergehalt im Gefüge, so dass die Zementhydratation und somit die puzzolanische Reaktion verbessert wird. Anhand der Bindemittelverhältnisse mit 20 Gew.-% Kaolin zeigt sich, dass mit sinkendem Zement- und konstantem

Kaolingehalt weniger Calciumhydroxid im Mörtel nachgewiesen wird. Durch den geringen Zementanteil wird die Bildung von  $C_3S$  herabgesetzt und weniger Calciumhydroxid freigesetzt. Bei den Zusammensetzungen mit 30 Gew.-% Kaolin trifft diese Feststellung vermutlich aufgrund der sehr geringen Werte oder auch möglicher Messfehler nicht zu.

#### **6.6.5 Ausblühverhalten**

Das Ausblühverhalten des Mörtels wurde mit sich wiederholenden, definierten Bewässerungszyklen untersucht. An mit melaminharzhaltigen Zusatzmitteln verflüssigten Mörteln können oftmals gelblich kristalline Rosetten mit einem Durchmesser von 0,1 bis 3 mm auf [26]. Jedoch nach 10 Zyklen konnten an keiner Probe Ausblühungen augenscheinlich festgestellt werden.

#### **6.6.6 Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck**

Die Wasseraufnahme der Mischungen ohne Zusatzmittel ist um das 3-4 fache höher als bei den Proben mit Zusatzmitteln. Die Begründung hierfür lässt sich aus den w/b-Werten ( $>0,96$ ) ableiten, durch diese werden viele den Wassertransport unterstützende vernetzte Kapillarporen gebildet und steigern so die Wasserdurchlässigkeit des Mörtels [27]. Vereinfacht kann man sagen, je höher der w/b-Wert desto größer ist die spätere Wasseraufnahmefähigkeit. Die Luftporenbildner haben nur einen geringfügigen Einfluss auf die Wasseraufnahme, der vernachlässigt werden kann (vgl. Abb. 23).

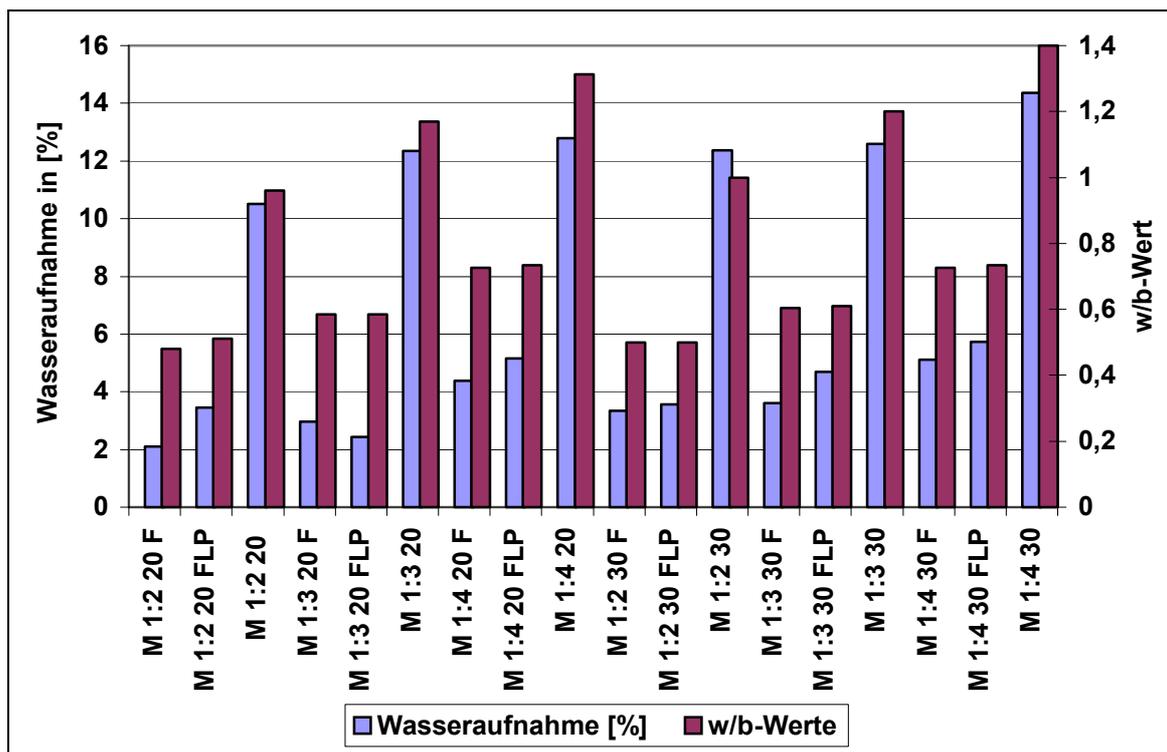


Abb. 23: Vergleich der w/b-Werte mit der Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck

## 6.7 Untersuchungen von Favoritmischungen

### 6.7.1 Porenverteilungen nach der Quecksilberdruckporosimetrie

Die Quecksilberdruckporosimetrie soll Aufschluss über die verschiedenen Porositäten und Porenverteilungen der einzelnen Mischungen geben. Die Gesamtporositäten werden je nach Mischung durch die Zugabe des Luftporenbildners um 2% - 14% erhöht. Ein unerwünschter Effekt der Beigabe von LP ist die Erhöhung der Kapillarporen um ca. 3 - 4% oder sogar um mehr als das Doppelte (vgl. M1:2 20 FLP) und die Reduktion des Gelporenanteils um ca. 1 - 2%. Diese ungünstige Porenverteilung kann als weiteres Zeichen der Inkompatibilität der beiden Zusatzmittel gedeutet werden. Mit dem Quecksilberporosimeter lassen sich nur die vernetzten Poren messen, deshalb spiegeln die Luftporengehalte nur einen oberflächennahen Ausschnitt des Gefüges wider.

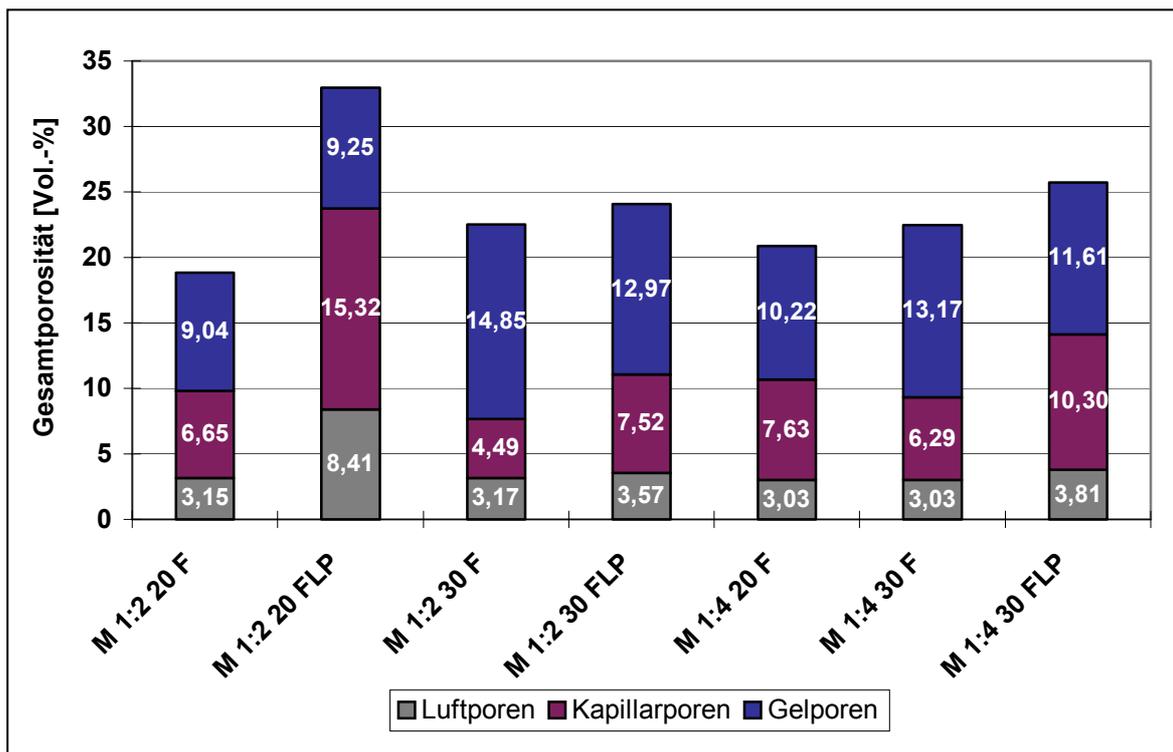


Abb. 24: Porenradienverteilungen

Der Vergleich der Rohdichten mit den verschiedenen Gesamtporositäten zeigt, dass trotz eines höheren oder ungefähr gleichen Porengehaltes die Proben mit einem b/z-Verhältnis von 1:4 eine höhere Rohdichte haben als diejenigen mit einem b/z-Wert von 1:2. Durch die Verdopplung des Zuschlages wird auch die Menge des Kalksteinmehles verzweifacht und somit vergrößert sich der Feinstoffanteil der Mischung mit einem b/z-Verhältnisses von 1:4 erheblich. Ein hoher Feinstoffgehalt, welcher die verbliebenen Hohlräume ausfüllt, führt zu einer dichteren Packung. Die Probe 1:4 20 F hat die höchste Rohdichte und das dichteste Gefüge.

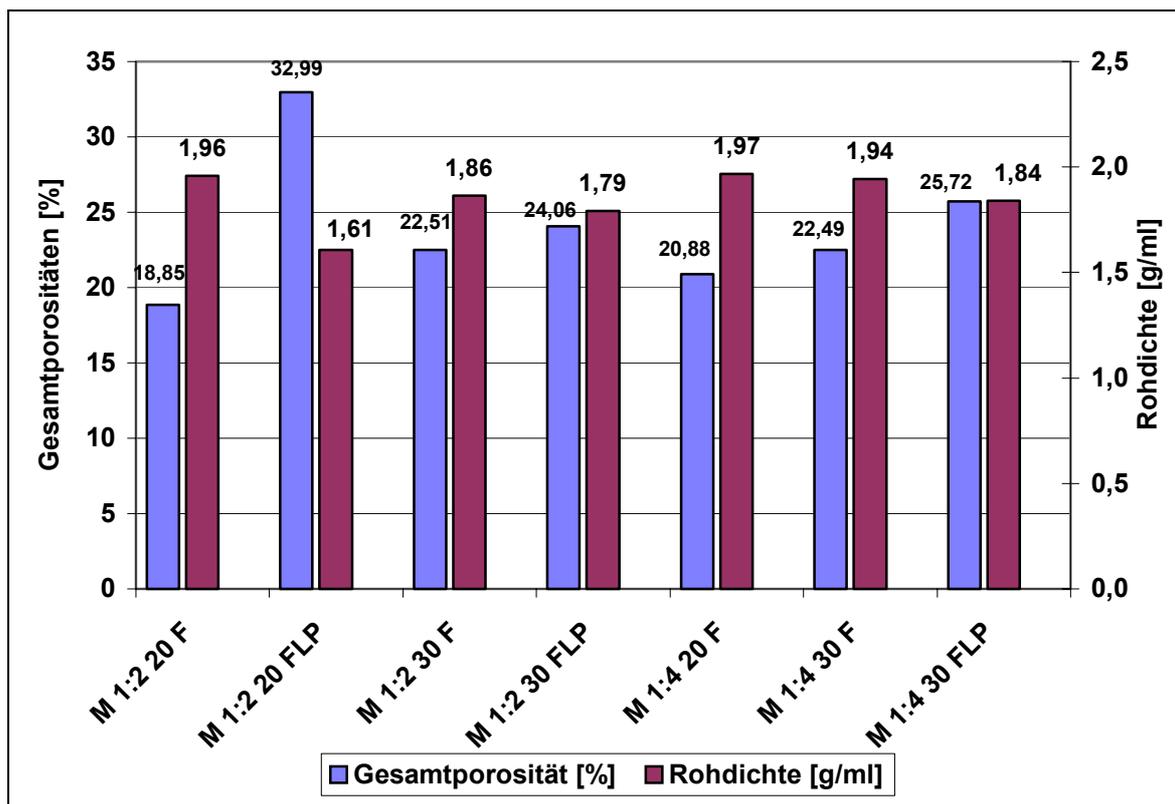


Abb. 25: Vergleich der Rohdichten und der Gesamtporositäten

### 6.7.2 Ergebnisse der Rasterelektronenmikroskopie

Ausgewählte Mörtelzusammensetzungen werden hinsichtlich der Gefügeeigenschaften und der entstandenen Bindemittelphasen mit der Rasterelektronenmikroskopie untersucht.

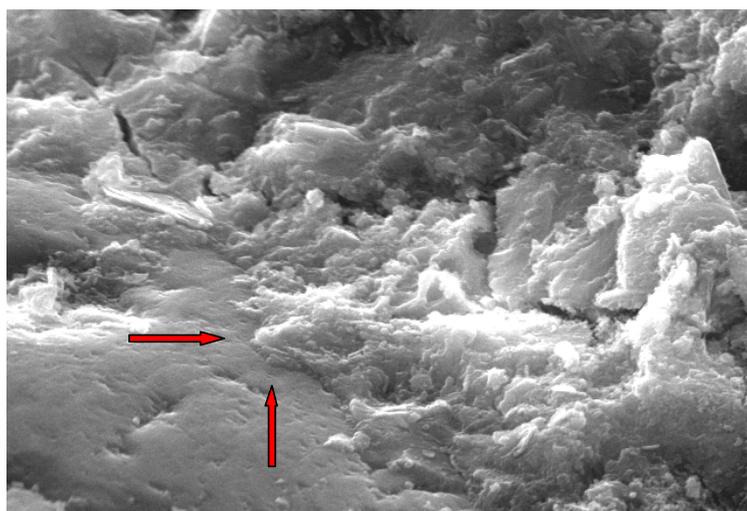


Abb.26: M1:4 20 F, SE-Bild, Bildbreite: 29,1  $\mu\text{m}$

Die Kontaktflächen Zuschlag/Bindemittel zeigen einen guten Verbund (Pfeile) und ein dichtes Bindemittelgefüge. ( links unten: Zuschlag; rechts: Zementstein)

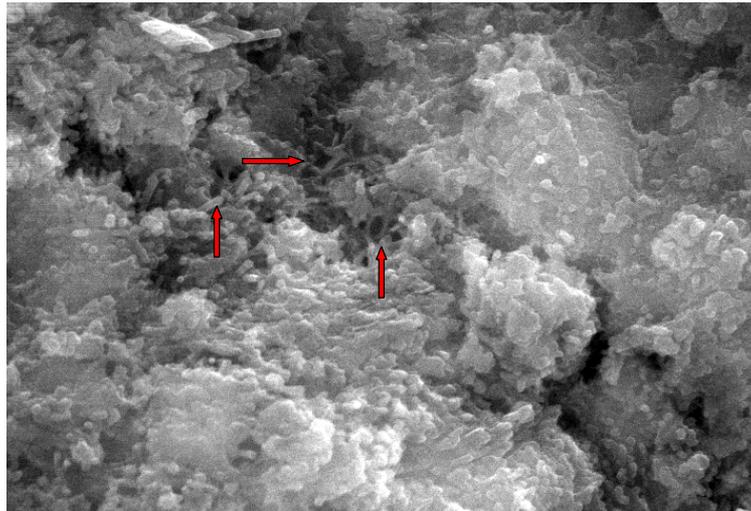


Abb.27: M1:4 30 FLP, SE Bild, Bildbreite: 11,6  $\mu\text{m}$

Es lassen sich lange, nadelige CSH-Phasen (Pfeile) und ein sehr dichtes Bindemittelgefüge erkennen.

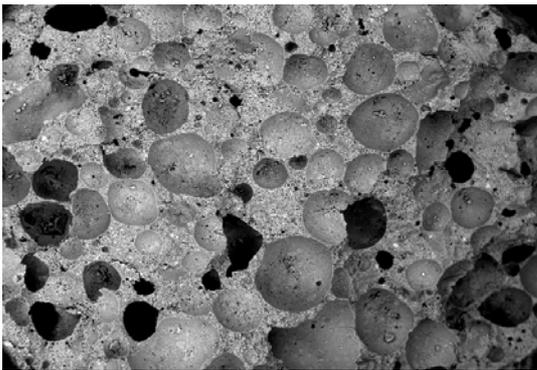


Abb.28: M1:2 20 FLP, BSE Bild,  
Bildbreite: 4,7 mm

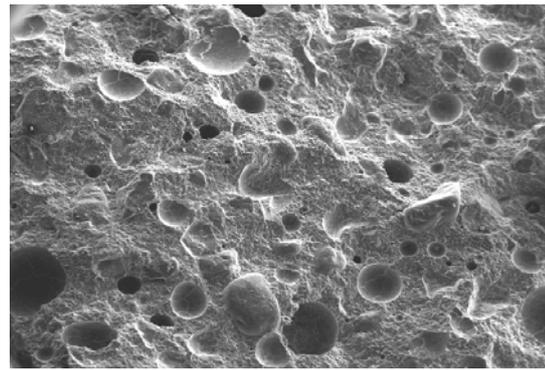


Abb.29: M 1:2 30 FLP, SE Bild,  
Bildbreite: 4,7 mm

Beim Vergleich der Abbildungen 28 und 29 werden die Porositätsunterschiede hervorgehoben. Die zahlreichen Poren der Probe M 1:2 20 FLP sind durchschnittlich 400  $\mu\text{m}$  groß, während die Poren in Abb.29 kleiner und homogener verteilt sind.

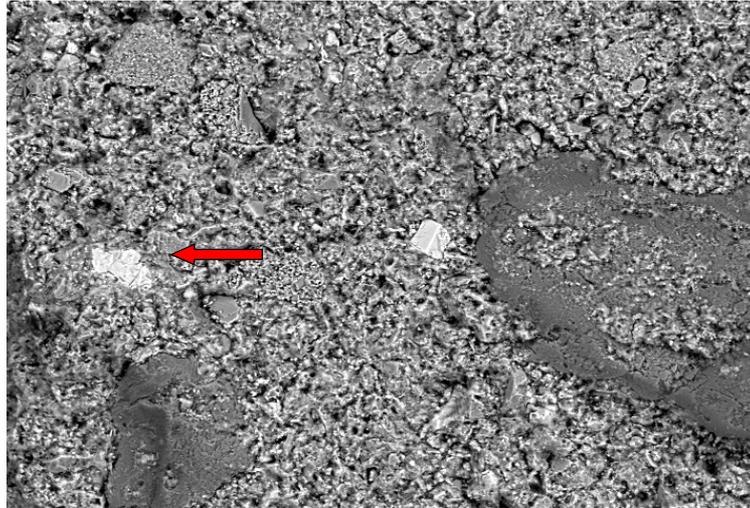


Abb.30: M1:4 30 F, BSE-Bild, Bildbreite: 580  $\mu\text{m}$

Mittels einer Röntgenbeugungsanalyse konnte das weiße längliche Teilchen (roter Pfeil) als nicht hydratisierter Zement identifiziert werden. (vgl. A 77). Die Form des anderen weißen Stückes weist auf Kalksteinmehl hin. Des weiteren ist wie in allen Proben der gute Verbund sowie das dichte Gefüge erkennbar.

### 6.7.3 Beurteilung der Dünnschliffe

Die in Kapitel 3 hergestellten Mörtelproben mit Originalmarmor aus Milet werden anhand von Dünnschliffen hinsichtlich ihrer Verträglichkeit mit Marmor untersucht.

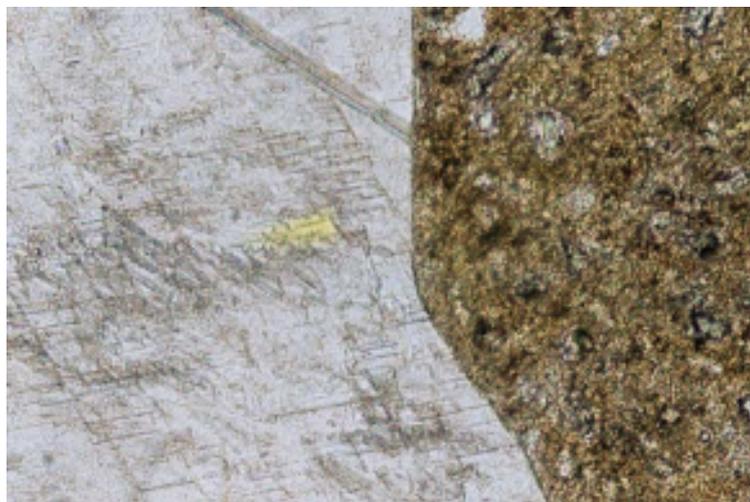


Abb.31: Ma 1 W, Durchlicht, Bildbreite:0,79 mm

In Abbildung 31 ist die Kontaktfläche von Marmor zu Mörtel einer im Wasserbad gelagerten Probe zu sehen. Im Marmor ist ein Hohlraum (gelb) vorhanden, der aber keine Verbindung zum Mörtel hat, sondern eine Schwachstelle im Marmorgefüge darstellt. Der Verbund des Marmors mit dem Mörtel ist gut, da an der Kontaktfläche keine Hohlräume (gelb) zu erkennen sind. Des weiteren zeigt sich ein dichtes Mörtelgefüge.

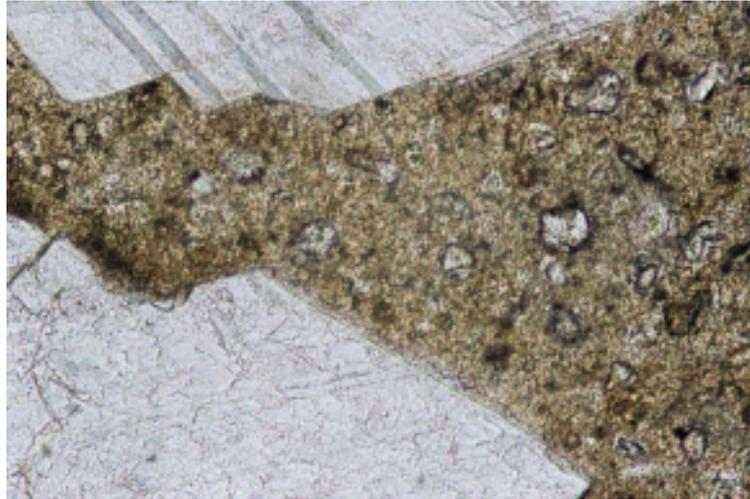


Abb.32: Ma 4 L Durchlicht Bildbreite:0,79 mm

Die in Abb.32 gezeigte Probe wurde an der Luft gelagert. Die Kontaktfläche Marmor zeigt wiederum keine Störungen und ein dichtes Mörtelgefüge.



Abb.33: Ma 1 C Durchlicht Bildbreite:3,94 mm

Die in Abbildung 33 dargestellte Probe wurde in einer Calciumhydroxidlösung aufbewahrt und zeigt wiederum einen guten Verbund von Marmor und Mörtel.

An den Dünnschliffen aller Proben konnten keine Gefügeveränderungen oder Verfärbungen an den Randflächen der Marmorteile festgestellt werden. Wenn die Mörtel den Marmor oberflächlich geschädigt hätten, würden man das an den Kontaktflächen Marmor/Mörtel deutlich erkennen. Die Calciumhydroxidgehalte der verwendeten Mörtel sind vergleichbar mit denen in A 5 Nr. 13-17. Diese Mörtel weisen nach 28 Tagen  $\text{Ca(OH)}_2$ -Werte zwischen 2 und 9% auf. Die verschiedenen Lagerungsarten im Wasser, an der Luft oder in einer Calciumhydroxidlösung haben keine Zersetzung des Marmors bewirkt. Weder die unterschiedlichen Calciumhydroxidgehalte noch die Lagerungsarten verursachen somit Schädigungen des Marmors.

#### 6.7.4 Abschließende Kompatibilitätsprüfung

Eine abschließende Untersuchung der Verträglichkeit des Marmors mit den verwendeten Zusatzmitteln wurde mit den Favoritenmischungen M 1:4 20 F, M 1:2 30 F und M 1:2 30 FLP durchgeführt. Der Frischmörtel wurde wie in Kapitel 4.1 beschrieben hergestellt und in ausgebohrte Marmorzylinder mit einem Innendurchmesser von 3 cm gefüllt. Je Mischung wurde ein Zylinder des grobkörnigen und einer des feinkörnigen Marmors verwendet. Die Zylinder lagerten, mit Plastikfolie abgedeckt, 7 Tage bei einer Temperatur von  $(20\pm 2)^{\circ}\text{C}$  und  $(60\pm 5)\%$  relativer Luftfeuchtigkeit. Beim Kontakt des Frischmörtels mit dem Marmor stellte sich ein unterschiedliches Saugverhalten der beiden Marmorarten ein, was durch die Verdunklung der Außenflächen infolge Wasseraufnahme beobachtet werden konnte. Die grobkörnige Probe zeigte ein schnelleres Saugverhalten als der mittelkörnige Marmor. Um eine Verfärbung nach Ablauf der 7 Tagen überhaupt feststellen zu können, sind die Marmorproben vor und nach dem Versuch fotografiert worden. Beim Vergleich der Bilder ( siehe A 77.1 und A 77.2 ) wird deutlich, dass der reine Calcitmarmor weiß bleibt, aber der mittelkörnige Dolomitmarmor eine leicht gelbliche Verfärbung, unabhängig von der verwendeten Mischung, angenommen hat. Dieser Farbunterschied wird vermutlich durch die noch enthaltene Feuchte verursacht. Eine ähnliche Gelbfärbung tritt beim Nässen des Dolomitmarmors mit destilliertem Wasser auf. Die kleineren Porenradien des mittelkörnigen Marmors und die bereits fortgeschrittene Kornentfestigung des Calcitmarmors sowie das differente Saugverhalten lassen auf ein langsames Trocknungsverhalten des Dolomitmarmors schließen. Zudem treten bei keiner Probe Risse bzw. das Abreißen der Kontaktfläche Marmor/Mörtel infolge von Schwinden auf. Da nach 7 Tagen der maßgebliche Anteil des Schwindens bereits abgeschlossen ist, treten vermutlich auch später keine Rissbildungen in den kleinen Zylindern auf. Das Schwinden dieser Mörtelproben kann nicht mit den in Kapitel 6.6.3 angegebenen Schwindmaßen verglichen werden, da bei den Proben in den Marmorzylindern eine Nachbehandlung erfolgt ist. Durch die Nachbehandlung wird das Schwinden erheblich reduziert.

## 6.8 Zusammenfassung der Resultate

Das Ziel der Diplomarbeit ist die Entwicklung eines kompatiblen Vergussmörtels zur Instandsetzung der Marmorsäulen des Marktttores von Milet. Zu diesem Zweck wurden Mörtel entwickelt die durch zahlreiche Prüfungen, zur Bestimmung einer optimalen stofflichen Zusammensetzung, getestet wurden. In den Testreihen konnten einige Mörtel und Zusatzmittel wie z.B. Kieselgur, FM 974 etc. aufgrund von negativen Eigenschaften bereits ausgeschlossen werden (siehe Kapitel 6.4). Die untersuchten Mörtelmischungen bestehen aus den gleichen Ausgangsstoffen und unterscheiden sich lediglich in der Zusammensetzung dieser.

Die Mischungen ohne Zusatzmittelgehalt sind ungeeignet, da diese Proben w/b-Werte  $>0,96$  besitzen, welche die Hauptursache für geringe Festigkeiten, hohe Porositäten und hohe Schwindmaße sind. Der Einsatz des Fließmittels Redoment verbessert allerdings die Verarbeitbarkeit und bewirkt somit eine Reduktion des Wasseranspruchs. Durch die niedrigen w/b Werte kann eine Verbesserung der Packungsdichte (Rohdichten vgl. Abb.25) und die Verdopplung der Festigkeit erreicht werden. Probleme treten erst bei den Kombinationen des Fließmittels Redoment mit dem LP 20 auf. Nach der Fließmitteloptimierung kann die in den Testreihen konstatierte verflüssigende Wirkung des Luftporenbildner nicht mehr festgestellt werden. Vermutlich handelt es sich um eine Unverträglichkeit der beiden Zusatzmittel ab bestimmten Mengenverhältnissen. Für diese These spricht die ungünstige Porenverteilung, der erhöhte Wasseranspruch und die gravierenden Porositätsunterschiede (vgl. w/b-Werte, Luftporengehalte, MIP). Erst ein Vergleich der chemischen Inhaltsstoffe, welche aufwendig bestimmt werden müssten, kann diese Behauptung bestätigen. Die erhöhten Porositäten beeinflussen negativ die Dichte, die Festigkeit und steigern das Schwinden.

Die physikalisch-mechanische und chemische Anpassung des Sanierungsmörtels an das Gestein minimiert Folgeschäden am Bauwerk. Eine Anpassung der verschiedenen Stoffkennwerte wie Festigkeit, Dichte etc. ist notwendig. Die Mörtelfestigkeit und der E-Modul sollten an den Marmor angepasst sein, da sonst Störungen an der Verbundzone Marmor/Mörtel vorprogrammiert sind. Um einen ausreichenden Lastabtrag zu gewährleisten, sollte der Mörtel aber auch nicht zu elastisch sein. Wenn der Mörtel die Last nicht ableiten kann, werden die dünnen Wände der hohlgebohrten Marmorsäulen zu stark beansprucht und es kommt zu Schäden wie Abplatzungen (vgl. Schadensanalyse des Marktttores von Milet von

Dr. rer. nat. Middendorf). Da der mittelkörnige Marmor eine Festigkeit von 59 N/mm<sup>2</sup> besitzt, wird als Kriterium für die Auswahl geeigneter Mischungen eine 28 Tage Druckfestigkeit um 50 N/mm<sup>2</sup> festgesetzt. Zudem sollte das Schwindmaß möglichst niedrig sein, um einen Abriss des Kontaktfläche Mörtel/Marmor zu vermeiden. Unabhängig vom Calciumhydroxidgehalt treten nach augenscheinlichen Betrachtungen keine Verfärbungen im Marmor auf (vgl. auch Kapitel 6.7.3). Nach bisherigen Ergebnissen blühen die Mörtel auch nicht aus (vgl. Kapitel 6.6.5). Die folgenden Proben (vgl. Mischungszusammensetzung) sind nach den genannten Kriterien geeignet:

Tab.8: Die Favoritenmischungen

Probe	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	Schwindmaß [‰]
M 1:4 20 F	50,63	0,858
M 1:4 30 F	52,78	0,925
M 1:2 30 FLP	51,36	1,281

Wobei von diesen drei Mischung die Probe M1:4 20 F am geeignetsten aufgrund des geringsten Schwindmaßes und der höchsten Rohdichte erscheint. Nach dem in Kapitel 6.7.4 beschriebenen Kompatibilitätstest kann man eine Unverträglichkeit einer dieser Mörtel mit dem Marmor von Milet weitestgehend ausschließen.

## 6.9 Fazit

Unter der Prämisse, dass die Verfärbung des Dolomitmarmors mit der Trocknung reversibel ist, können die drei Favoritenmischungen (vgl. Tab.8) als geeignet angesehen werden. Weder der Calciumhydroxidgehalt noch die verwendeten Zusatzmittel beschleunigen nach bisherigen Erkenntnissen den Zerfall des Marmors und sind zudem auch in Verbindung mit Stahl (vgl. Kapitel.6.3.7) einsetzbar. Ein Nachteil dieser Zusammensetzungen ist die kurze Verarbeitungszeit von nur ca. 20 Minuten, welche durch die Wirkungsweise des Fließmittels Redoment verursacht wird (vgl. Kapitel 6.2.6). Die Verträglichkeit des entwickelten Mörtels mit den im Bestand vorhanden Steinerfüllstoffen kann erst anhand der genauen Analyse der Mörtel eindeutig geklärt werden. Diese Analyse wird von der Universität Göttingen durchgeführt und ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht abgeschlossen. Einige Beispiele wurden jedoch in Kapitel 6.1.2 beschrieben. Die

Favoritenmörtel sind aufgrund ihres geringen Calciumhydroxidgehaltes, ihrer dem Marmor angepassten Festigkeiten und geringen Schwindmaße als Sanierungsmörtel am Markt von Milet einsetzbar.

## **7 Ausblick**

Zur Verlängerung der Verarbeitbarkeitszeit könnte eine Verzögerer zum Einsatz kommen, der aber wieder auf Kompatibilität mit den Marmoren geprüft werden müsste. Die Reduktion des Gewichtes unter Zuhilfenahme der Luftporenbildner ist mit Nachteilen behaftet. Für diese Problematik sollten statisch konstruktive Lösungen gefunden werden. Durch die Einbringung eines Vergussmörtel kann sichergestellt werden, dass keine Hohlräume auftreten. Außerdem sind die Eigenschaften dieses Vergussmörtels weitestgehend bekannt im Gegensatz zu den Inhaltsstoffen der Mörtel im Bestand, so dass die Entfernung der Steinerfüllungselemente empfehlenswert ist.

## Literaturverzeichnis

- [1] Pergamonmuseum in Berlin [Hrsg.]: Informationsbroschüren.
- [2] Daten von Dr. rer. nat. Middendorf.
- [3] Matthes S. :Mineralogie: Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde, Mineralogie, Springer-Verlag Berlin/ Heidelberg/ Tokyo 1983.
- [4] Barth, T., Correns C., Eskola P.: Die Entstehung der Gesteine Reprint Springer – Verlag, Berlin/ Heidelberg/ New York 1970.
- [5] Müller, F.: Gesteinskunde, 2 Auflage, Ebener Verlag 1987.
- [6] Henning, O., Knöfel, D.: Baustoffchemie, 6. Auflage, Verlag Bauwesen Berlin 2002.
- [7] Cramer, T.: Eigenschaften und Methoden der Herkunftsbestimmung von Marmoren, Marmore des Telephosfrieses am Pergamonaltar, <http://www.tu-berlin.de>.
- [8] Grimm, W.-D.: Verformung von Marmorobjekten, in: Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, Themenheft: Marmor-Konservierung, Band 150 Teil 2, S.195-235, Stuttgart August1999.
- [9] Maravelaki-Kalaitzaki, P., Moraitou, G.: Sorel`s cement mortars Decay susceptibility and effect on Pentelic marble, in: Cement and Concrete Research Heft 29, 1999 S.1929-1935.
- [10] Arbeitskreis Prüftechnik des Bundesverbandes der deutschen Kalkindustrie [Hrsg.]: Arbeitsvorschrift zur Bestimmung des ungebundenen CaO-Anteils (nach Gehrke), in Arbeitsblatt 13, November 1987.
- [11] Knöfel, D., Schubert, P.: Handbuch Mörtel und Steinerfüllungsstoffe in der Denkmalpflege, Verlag Ernst und Sohn, Berlin1983.
- [12] Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe [Hrsg.], Franken, S., Müller, H.: Historische Mörtel und Reparaturmörtel.
- [13] Rothert, E.: Gesteinstechnische Eigenschaften ausgebauter Marmore des Marktores von Milet, Bachelorarbeit, Universität Göttingen.

- [14] Müller, K.: Mineralogisch gefügekundliche und gesteintechnische Eigenschaften von Geomaterialien des Markttores von Milet, Diplomarbeit , Universität Göttingen.
- [15] Stark, J., Wicht, B.: Der Baustoff als Werkstoff, in: Zement und Kalk, Birkhäuser Verlag 2000.
- [16] Herstellerdaten des Weißzementes der Firma Dyckerhoff.
- [17] Firma Imerys [Hrsg.]: Herstellerdaten des calcinierten Kaolins Metastar 501.
- [18] Daten des Kalksteinmehles Calibrit der Firma Omya, <http://www.omya.de>.
- [19] Herstellerdaten des Quarzsandes H 31 der Quarzwerke Frechen <http://www.quarzwerke.com/...Quarz/unbeschichtet/Sand/Haltern/H31>
- [20] Herstellerdaten des Fließmittels Redoment der Firma Rethmeier, <http://www.rethmeier.de>.
- [21] Wirkung von Fließmitteln, <http://www.heidelbergcement.com> .
- [22] Kleen, E.: Zusatzmittel für Hochleistungsbetone, in Tiefbau 7/1999.
- [23] Bauberatung Zement [ Hrsg.]: Betonzusätze, Zusatzmittel und Zusatzstoffe, in: Zement-Merkblatt Betontechnik.
- [25] Wild, S., Khatib, J.M.: Portlandite Consumption in Metakaolin Cement Pastes and Mortars, in : Cement and Concrete Research, Vol. 27 , 1997, S. 137-146.
- [26] Sturm, B.; Wutz, K.: Unterdrückung von Ausblühungen bei Melaminharz infizierten Mörteln, <http://www.db.baustoffchemie.de> .
- [27] Verein deutscher Zementwerke e.V. [Hrsg.]: Zement Taschenbuch 2000, Bau + Technik Verlag.

**Anhang**

## Probenbeschreibung der Bohrkerne I-III

### Bohrkern I, Ø 30 mm, 4. Pfeiler von links

Bohrkerntiefe 140 mm, Stahl ist oberflächlich korrodiert

Phenolphthaleintest positiv, Mörtel am Stahl ist alkalisch

Bk 1/1 Marmor 60 mm

Bk 1/3 feinkörniger Ziegel (?) 60 mm

Bk 1/4 Mörtel weiß, Kontakt zum Stahl 20 mm

Bk 1/2 Bohrmehl Mörtel/Ziegel braun

### Bohrkern II, Ø 30 mm, 5. Pfeiler von links

Bohrkerntiefe 135 mm (äußere Beschädigung ca. 0,5 mm)

Stahlpfeilertiefe ca. 140 cm wie bei Bk 1

Bk 2/1: Marmor 3,5 cm

Bk 2/2: grobkörniger weißer Mörtel 4,0 cm

Bk 2/3: feinkörniger Ziegel (?) ca. 5,5 cm

Bk 2/4: Kontaktmörtel weiß am Stahl ca. 1,0 cm

### Bohrkern III, Ø 30 mm, Rückwand hinter zweiter Säule (hinten) links

Restaurationsphase 1925-29

Bohrkernlänge 144 mm (ein Stück)

Deckputz 5 mm

grauer feinkörniger Mörtel 29 mm

Ziegel 110 mm



## Probenbeschreibung der Bohrkerne IV-V

### **Bohrkern IV**, Ø 30 mm, 1. Säule links

Aufbauphase 1925-29

1952-54

Bohrkernlänge ca. 94 mm

Bk 4/1 Deckschicht 8 mm

Bk 4/2 feinkörniger Mörtel 14 mm

feinkörniger Ziegel (?) 40 mm

weißer Fugenmörtel

Bk 4/3 weißer Mörtel 32 mm

Bk 4/4 Marmor

Bk 4/5 Krümel

Bk 4/6 oberflächige Salze



### **Bohrkern V**, Ø 30 mm, 2. Säule links, hintere Säule

Orig. Ergänzung Aufbau 1925-29

Bohrkertiefe ca. 155 mm

Marmor Steinerfüllungsmörtel 5 – 10 mm

einkörniger Beton 55 mm

Weißer grobkörniger Mörtel 35 mm

Feinkörniger Ziegel 60 mm



## Probenbeschreibung der Bohrkern VI-VII

**Bohrkern VI**, Ø 30 mm, 3. Säule rechts hinten  
Wiederaufbau nach Bombenangriff 1952-54  
Bohrkernlänge 118 mm, kein Stahl angebohrt  
Steinergänzungsmörtel ca. 20 mm  
Feinkörniger Beton bis Bohrkernende



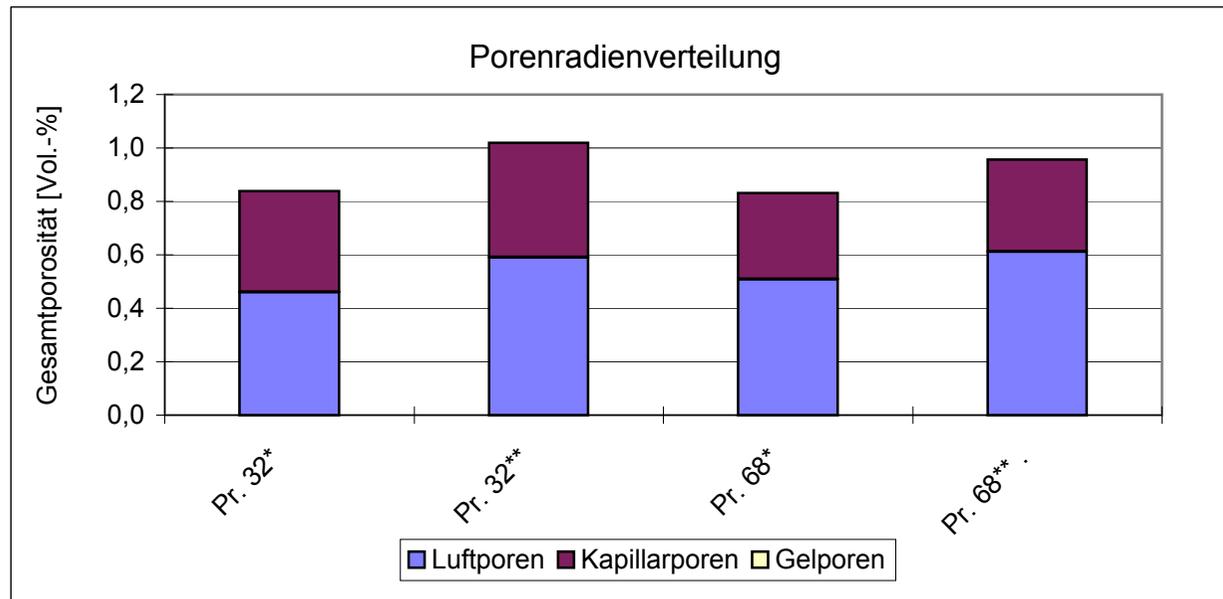
**Bohrkern VII**, Ø 30 mm,  
Rückwand hinter 3. Säule von rechts  
Neuer Putz 1952 – 1954  
Bohrkerntiefe 120 mm  
Putz 15 mm,  
dahinter Ziegel



Probe	Rohdichte [g/ml]	Reindichte [g/ml]	Porosität [Vol.-%]	Luftporen [Vol.-%]	rel. Luftporengehalt	Kapillarporen [Vol.-%]	rel. Kap.-porengehalt	Gelporen [Vol.-%]	mittl. Porenradius µm	Por.-Vol. 10 µm [Vol.-%]	Por.-Vol. 0.03 µm [Vol.-%]	Gesamtvol. Probe [ml/g]	Dyn.-E-Modul [KN/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]
Pr. 32*	2,707	2,730	0,8392	0,4602	54,8	0,3790	45,2	0,0000	25,269	0,0017	0,0031	0,0031	54,3	95,00
Pr. 32**	2,680	2,707	1,0182	0,5895	57,9	0,4287	42,1	0,0000	54,525	0,0022	0,0038	0,0038		
Pr. 68*	2,681	2,703	0,8311	0,5094	61,3	0,3217	38,7	0,0000	54,677	0,0019	0,0031	0,0031	42,9	59,00
Pr. 68**	2,659	2,685	0,9573	0,6116	63,9	0,3457	36,1	0,0000	52,818	0,0023	0,0036	0,0036		

\* unverändert

\*\* thermisch beansprucht



A. 4.1: Kenndaten der Marmore des Marktores von Milet [Universität Göttingen, Abteilung Strukturgeologie & Geodynamik]

Nr.	Probenname	Bindemittel			Zuschlag		w/z-Wert	Ausbreitmaß [cm]	ungebundenen Ca(OH) <sub>2</sub> [M-%]			Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	
		[M-%]			[M-%]	[V-%]			3d	7d	28d	28d	90d
		Zement	Kaolin	Kieselgur	H 31	MHG							
		<b>Mischungsverhältnis 1:3</b>											
1	1:3	100			100		0,7	18,5	11,7	10,2	5,9	32,87	16,86
2	1:3/20%KG	80		20	100		0,8	19,0	10,7	8,0	2,6	19,70	20,97
3	1:3/30%KG	70		30	100		1,0	19,0	10,4	7,6	3,0	14,47	10,21
4	1:3/40%KG	60		40	100		1,1	19,0	8,7	6,8	1,1	8,57	5,53
5	1:3/20%Kao	80	20		100		0,8	19,5	6,1		3,9	28,46	21,73
6	1:3/30%Kao	70	30		100		0,9	19,0	5,9	3,5	1,5	20,46	14,32
7	1:3/40%Kao	60	40		100		0,9	19,0	4,3	3,2	1,3	15,04	10,53
		<b>Mischungsverhältnis 1:4</b>											
8	1:4	100			100		0,97	19,0	7,2	6,3	4,6	17,51	14,45
9	1:4/20%KG	80		20	100		1,03	19,0	8,3	4,3	3,2	12,00	9,47
10	1:4/20%Kao	80	20		100		1,00	19,0	8,0	5,4	-	14,52	11,91
11	1:4/30%Kao	70	30		100		1,01	19,0	6,3	3,5	-	13,79	9,97
12	1:4/40%Kao	60	40		100		1,01	18,5	5,0	2,8	0,9	7,78	2,89
		<b>Mischungsverhältnis 1:2</b>											
13	1:2	100			100		0,50	19,5	9,1	11,1	9,4	54,11	49,16
14	1:2/20%KG	80		20	100		0,65	20,0	10,7	9,3	5,7	28,02	29,72
15	1:2/20%Kao	80	20		100		0,57	18,0	6,3	5,0	4,6	45,45	37,20
16	1:2/30%Kao	70	30		100		0,63	19,0	5,7	5,2	3,0	33,59	28,44
17	1:2/40%Kao	60	40		100		0,70	18,0	4,3	3,3	2,0	28,22	22,44
		<b>Mischungsverhältnis 1:3</b>											
18	1:3/20%KG/ 7,5% MHG	80		20	100	+7,5	0,84	18,5	5,6	5,4	2,8	16,10	14,50
19	1:3/20%Kao/ 7,5% MHG	80	20		100	+7,5	0,80	19,0	6,5	4,6	2,6	25,14	17,27
20	1:3/20%Kao/ 10% MHG	80	20		100	+10	0,80	20,5	6,5	4,6	3,0	22,69	15,30

A. 5.1: Ausgangsmischungen

Bezeichnung	w/b-Wert	Wasser [g]	Zementgehalt [g]	Kieseligur [g]	Kaolin [g]	Marmor [g]	Ausbreitmaß [cm]
Ma1	0,52	130	250	-	-	500	18,5
Ma2	0,7	175	200	-	50	500	19
Ma3	0,728	182	175	-	75	500	18,5
Ma4	0,86	215	150	-	100	500	18,5
Ma5	0,76	190	200	50	-	500	19

**Anmerkung:**

Die in Wasser gelagerten Mischungen werden z.B. mit Ma1W bezeichnet.

Die in Calciumhydroxidlösung gelagerten Proben werden z.B. mit Ma1C bezeichnet.

Die an der Luft gelagerten Mischungen werden z.B. mit Ma1L bezeichnet.

A. 6.1: Kompatibilitätsprüfung mit Originalmarmor aus Milet

Bezeichnung	w/b - Wert	Wasser [g]	Zement [g]	Kaolin [g]	H 31 [g]	MMO [g]	LP 20 [g]	MHG [cm³]	FM [g]	Ausbreitmaß [cm]
M 1	0,58	145	200	50	500	-	-	-	-	17,5/17,0
M 1.1	0,56	140	200	50	500	0,512	-	-	-	18,0/17,5
M 1.2	0,52	130	200	50	500	-	6,25	-	-	17,5/17,5
M 1.3	0,6	150	200	50	500	-	-	25,6	-	16,0/18,5
M 1.4	0,48	120	200	50	500	-	-	-	4	18,0/18,5

A. 7.1: Testreihe 1

Bezeichnung	w/b Wert	Wasser [g]	Zement [g]	Kaolin [g]	H 31 [g]	MMO [g]	LP 20 [g]	MHG [cm³]	FM [g]	Ausbreitmaß [cm]
M 1.5	0,4	100	200	50	500	-	-	-	6	17,5/17,5
M 1.6	0,4	100	200	50	500	0,512	-	-	4	18,0/19,0
M 1.7	0,4	100	200	50	500	-	6,25	-	3	17,0/17,0
M 1.8	0,4	100	200	50	500	-	-	25,6	6	17,5/18,0

A. 7.2: Testreihe 2

Bezeichnung	w/b-Wert	Wasser [g]	Zement [g]	Kaolin [g]	H 31 [g]	MMO [g]	LP 20 [g]	MHG [cm³]	FM [g]	Luftporen- gehalt [%]	Ausbreit- maß [cm]	Dichte [g/cm³]
M 1.9	0,4	400	800	200	2000	-	-	-	24	3,2	17,0/17,5	2,086
M 1.10	0,4	400	800	200	2000	-	25	-	12	9,5	13,0/14,0	1,918
M 1.11	0,4	400	800	200	2000	2,048	-	-	16	19,5	14,5/13,0	1,824
M 1.12	0,4	400	800	200	2000	-	-	102,4	24	4,8	15,0/14,0	2,113
M 1.13	0,58	580	800	200	2000	-	-	-	-	2,6	18,0/17,5	2,102

A. 8.1: Testreihe 3

Bezeichnung	w/b-Wert	Wasser [g]	Zement [g]	Kaolin [g]	H31 [g]	MMO [g]	LP20 [g]	MHG [cm3]	FM [g]	Omycarb [g]	Calibrit [g]	Ausbreit- maß [cm]
M 1.14	0,5	125	200	50	300	-	6,25	-	13	200	-	18,0/18,0
M 1.15	0,48	120	200	50	300	-	6,25	-	12	-	200	flüssig
M 1.16	0,86	215	200	50	300	-	6,25	-	-	200	-	19,5/19,5
M 1.17	0,72	180	200	50	300	-	6,25	-	-	-	200	21,0/21,5
M 1.18	0,9	225	200	50	300	-	-	-	-	200	-	19,5/19,5
M 1.19	0,76	190	200	50	300	-	-	-	-	-	200	20,5/20,5

A. 8.2: Testreihe 4

Bezeichnung	w/b-Wert	Zement [g]	Kaolin [g]	H 31 [g]	Calibrit [g]	FM [g]	LP 20 [g]	Wasser [g]	Ausbreit- maß [cm]	MHG [cm <sup>3</sup> ]	Druckfestigkeit 7 Tage Wert a [N/mm <sup>2</sup> ]	Druckfestigkeit 7 Tage Wert b [N/mm <sup>2</sup> ]	Mittelwert Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
<b>M 2.1</b>	0,46	200	50	300	200	15	-	115	25,0/26,0	-	68,8	66,3	<b>67,55</b>	32494
<b>M 2.2</b>	0,42	200	50	300	200	15	6,25	105	19,0/20,0	-	43,79	42,87	<b>43,33</b>	22756
<b>M 2.3</b>	0,44	200	50	300	200	15	-	110	21,0/19,0	25,6	62,44	60,2	<b>61,32</b>	28572
<b>M 2.4</b>	0,74	200	50	300	200	-	-	185	19,0/19,0	-	26,28	28,09	<b>27,185</b>	18070
<b>M 3.1</b>	0,58	160	40	360	240	13	-	115	21,0/21,0	-	51,54	53,71	<b>52,625</b>	30414
<b>M 3.2</b>	0,55	160	40	360	240	13	6,25	110	21,0/20,5	-	31,02	30,24	<b>30,63</b>	20126
<b>M 3.3</b>	0,6	160	40	360	240	13	-	120	20,0/20,5	25,6	45,85	48,23	<b>47,04</b>	26939
<b>M 3.4</b>	0,93	160	40	360	240	-	-	185	19,5/20,0	-	53,66	17,15	<b>19,34</b>	17223

A. 9.1: Testreihe 5

Bezeichnung	w/b-Wert	Wasser [g]	Zement [g]	Kaolin [g]	H 31 [g]	FM [g]	Calibrit [g]	Ausbreitmaß [cm]
MW 1.1	0,4	100	200	50	300	3	200	27,5/27,5
MW 1.1	0,4	100	200	50	300	4	200	flüssig
MF 1.1	0,48	120	200	50	300	15	200	23,5/24,0

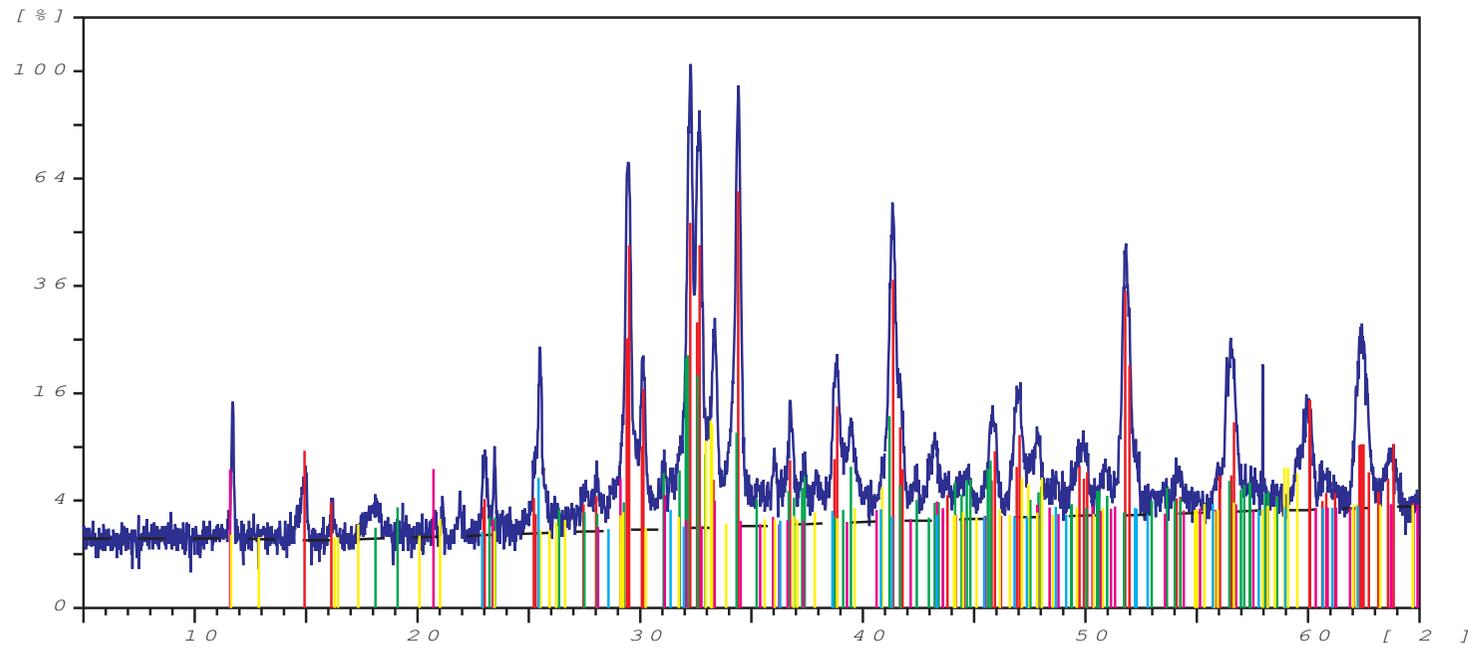
A. 10.1: Testreihe 6

Bezeichnung	w/b- Wert	Wasser [g]	Zement [g]	Kaolin [g]	H 31 [g]	FM [g]	Calibrit [g]	Ausbreitmaß [cm]
M 1.20	0,432	108	200	50	300	15	200	19,0/19,0
M 4.20	0,48	120	150	100	300	15	200	20,0/20,0
MKG 20	0,584	146	200	50	300	16	200	28,0/29,0
M 5.20	0,525	105	160	40	360	15	240	25,5/26,5

A. 10.2: Testreihe 7

	Wasser	w/b-Wert	Ausbreitmaß	Ausbreitmaß	mittleres Ausbreitmaß	Zement	Kaolin	H 31	Calibrit	FM	LP 20
	[ g ]		[ cm ]	[ cm ]	[ cm ]	[ g ]	[ g ]	[ g ]	[ g ]	[ g ]	[ g ]
M 1:2 20 F	360	0,48	24,0/24,0	24,5/24,5	24,5/24,5	600	150	900	600	45	-
M 1:2 20 FLP	384	0,512	24,0/24,5	25,0/25,0	24,5/25,0	600	150	900	600	45	6
M 1:2 20	720	0,96	24,3/24,3	23,8/24,0	24,0/24,0	600	150	900	600	-	-
M 1:3 20 F	351	0,585	24,3/25,1	25,1/25,8	25,0/25,5	480	120	1080	720	42	-
M 1:3 20 FLP	351	0,585	24,6/ 24,4	24,2/24,0	24,5/24,0	480	120	1080	720	42	4,8
M 1:3 20	702	1,17	24,0/24,0	24,8/24,8	24,5/24,5	480	120	1080	720	-	-
M 1:4 20 F	327	0,727	24,5/23,5	25,5/25,2	25,0/24,5	360	90	1080	720	33	-
M 1:4 20 FLP	330	0,733	24,0/24,0	24,0/23,8	24,0/24,0	360	90	1080	720	33	3,6
M 1:4 20	591	1,313	24,5/24,0	24,2/24,5	24,5/24,5	360	90	1080	720	-	-
M 1:2 30 F	375	0,5	23,5/24,5	24,8/25,0	24,0/25,0	525	225	900	600	45	-
M 1:2 30 FLP	375	0,5	24,0/24,0	24,0/24,0	24,0/24,0	525	225	900	600	45	5,25
M 1:2 30	750	1	24,0/24,0	24,0/23,7	24,0/24,0	525	225	900	600	-	-
M 1:3 30 F	363	0,605	23,5/24,5	24,0/24,2	24,0/24,5	420	180	1080	720	42	-
M 1:3 30 FLP	366	0,61	24,8/24,2	24,0/23,5	24,5/24,0	420	180	1080	720	42	4,2
M 1:3 30	720	1,2	24,0/24,0	24,4/24,2	24,0/24,0	420	180	1080	720	-	-
M 1:4 30 F	327	0,727	23,9/24,1	24,2/24,5	24,0/24,5	315	135	1080	720	33	-
M 1:4 30 FLP	330	0,733	24,5/25,5	24,0/24,5	24,5/25,0	315	135	1080	720	33	3,15
M 1:4 30	630	1,4	23,8/24,3	24,0/23,5	24,0/24,0	315	135	1080	720	-	-

A. 11.1: Ausgewählte Mischungszusammensetzungen

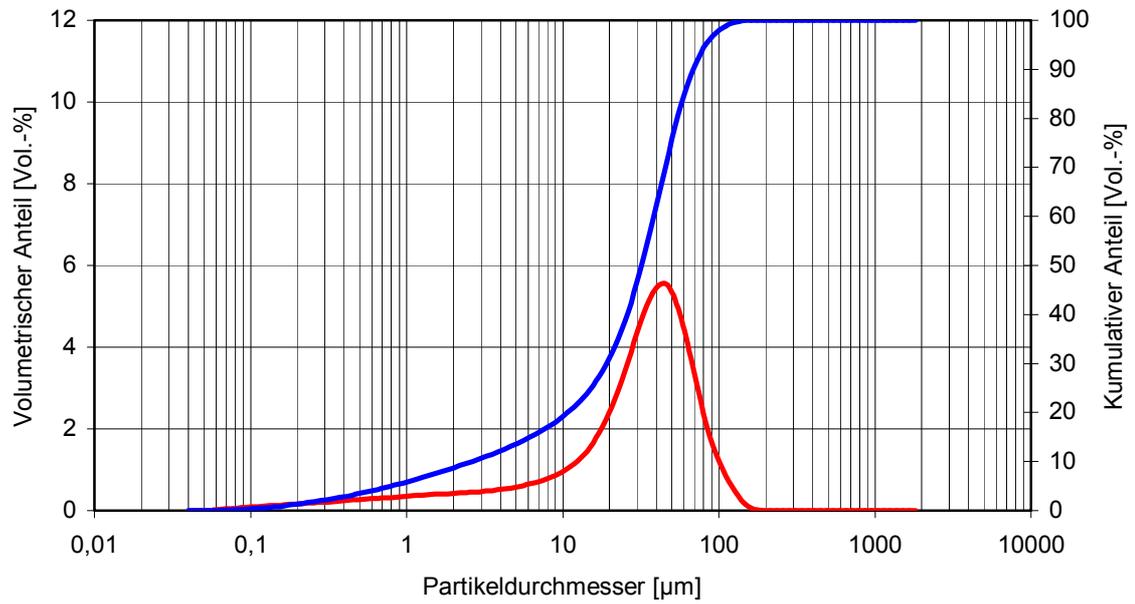


VMWZ1

42-0551	Calcium Silicate	$Ca_3SiO_5$
33-0302	Larnite, syn	$Ca_2SiO_4$
33-0311	Gypsum, syn	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$
32-0148	Calcium Aluminum Oxide	$Ca_3Al_2O_6$
37-1496	Anhydrite, syn	$CaSO_4$

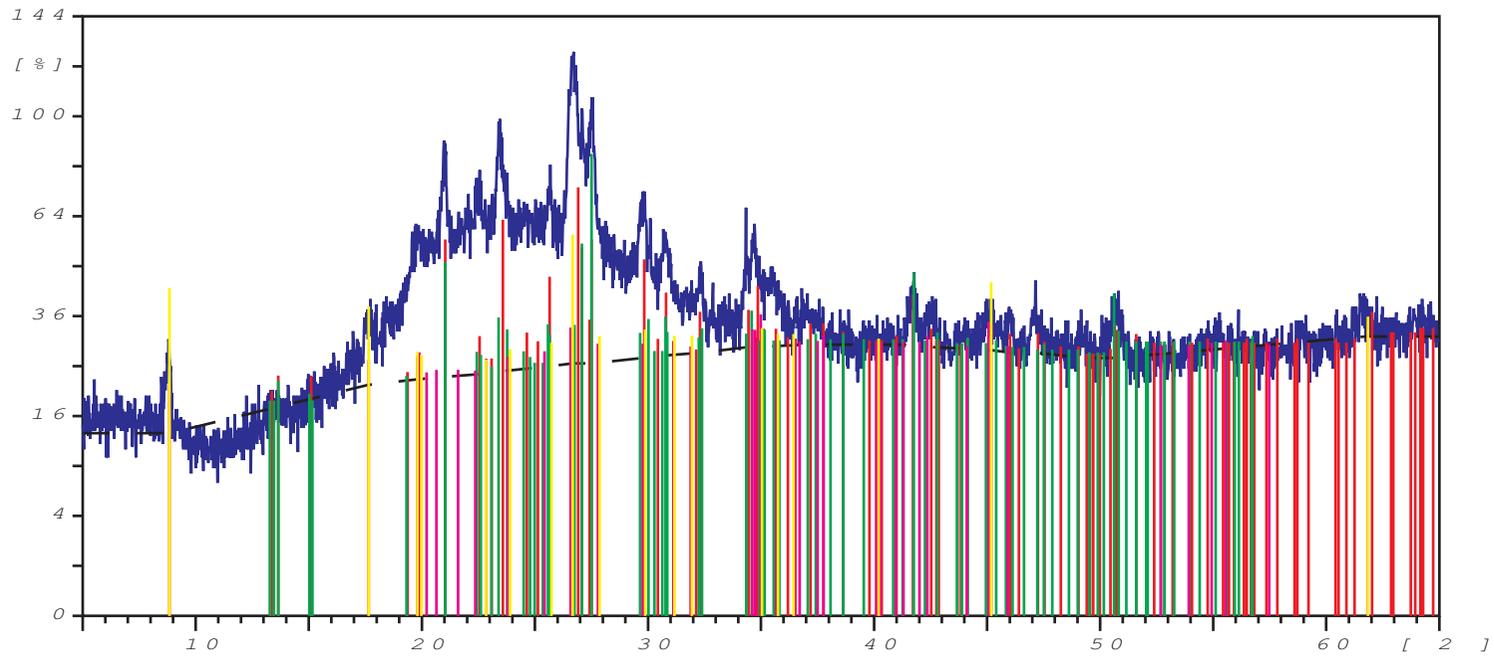
A. 12.1: Röntgenogramm Weißzement

## Weißzement CEM I 52,5 N (sw)



Statistische Werte:		
<b>Mittelwert:</b>	38,39	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Standardabweichung:</b>	28,37	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Variationskoeffizient:</b>	73,91	[%]
<b><math>d_{10}</math>:</b>	2,873	[ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>d_{50}</math>:</b>	35,22	[ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>d_{90}</math>:</b>	75,49	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Spezifische Oberfläche:</b>	15573	[ $\text{cm}^2/\text{ml}$ ]
<b>Maximum:</b>	45,75	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Varianz:</b>	805	[ $\mu\text{m}^2$ ]

A. 13.1: Korngrößenverteilung Weißzement

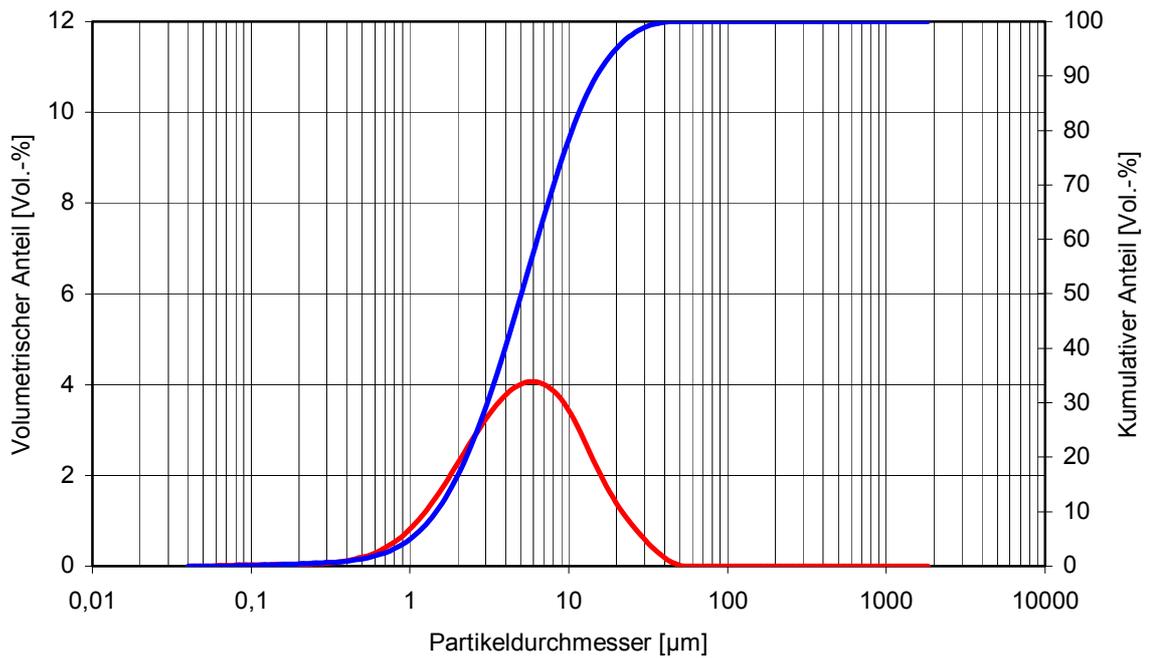


VMKAO

31-0966	Orthoclase	$KAlSi_3O_8$
19-0932	Microcline, intermediat	$KAlSi_3O_8$
07-0032	Muscovite 2M1, syn	$KAl_2Si_3AlO_{10}(OH)_2$
26-0911	Illite-2\ITM#1\RG	$(K,H_3O)Al_2Si_3AlO_{10}(OH)$

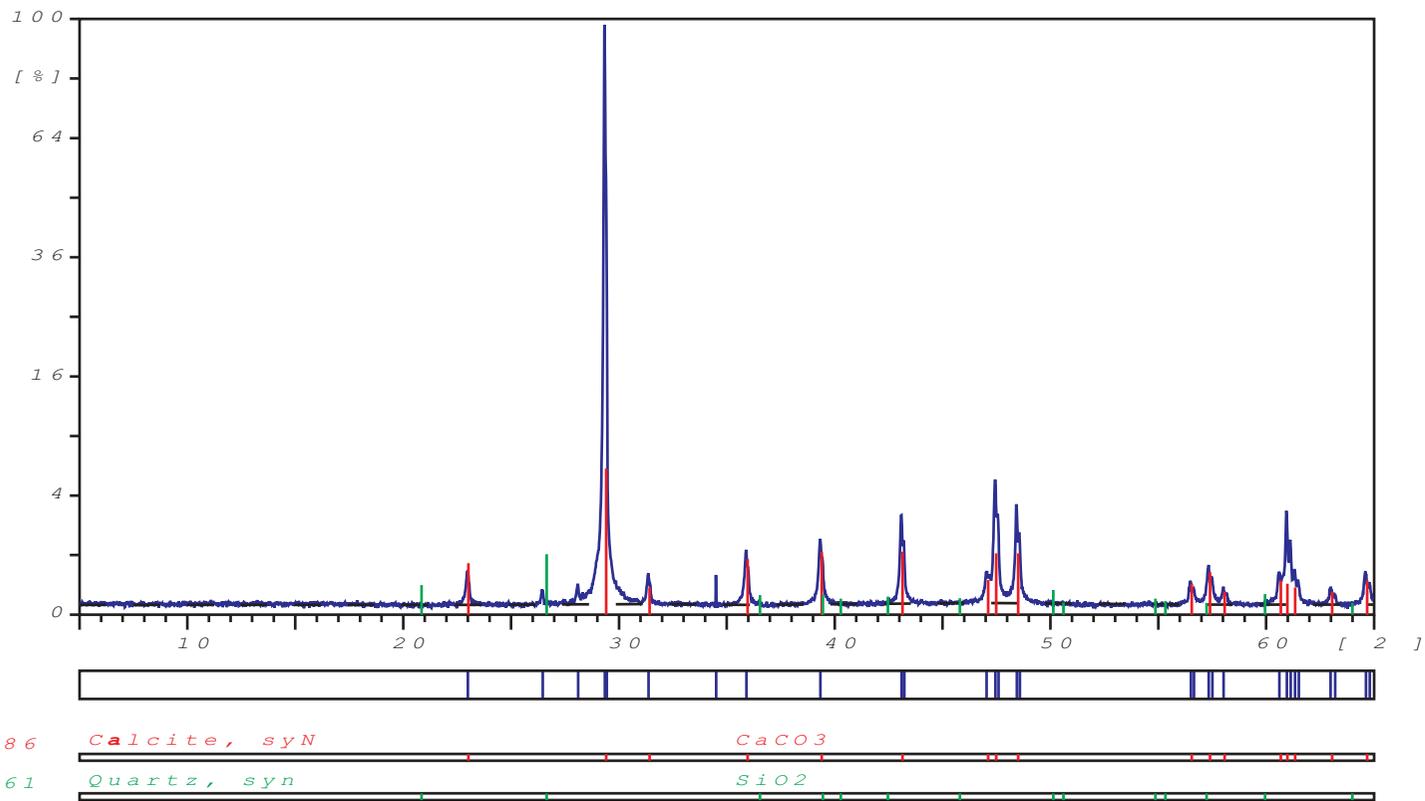
A. 14.1: Röntgenogramm Metakaolin

### Kaolin Metastar 501



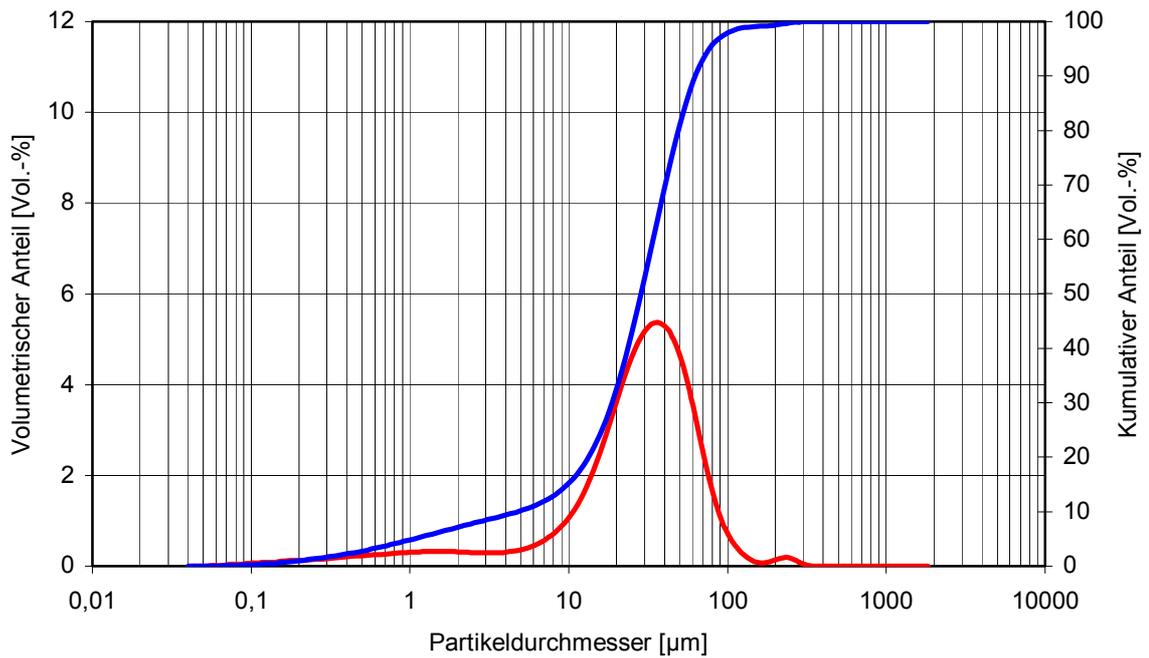
<b>Statistische Werte:</b>		
<b>Mittelwert:</b>	7,641	[µm]
<b>Standardabweichung:</b>	6,885	[µm]
<b>Variationskoeffizient:</b>	90,1	[%]
<b>d<sub>10</sub>:</b>	1,611	[µm]
<b>d<sub>50</sub>:</b>	5,532	[µm]
<b>d<sub>90</sub>:</b>	16,47	[µm]
<b>Spezifische Oberfläche:</b>	19221	[cm <sup>2</sup> /ml]
<b>Maximum:</b>	6,452	[µm]
<b>Varianz:</b>	47,4	[µm <sup>2</sup> ]

A. 15.1: Korngrößenverteilung Kaolin Metastar 501



**A. 16.1: Röntgenogramm Calibrit**

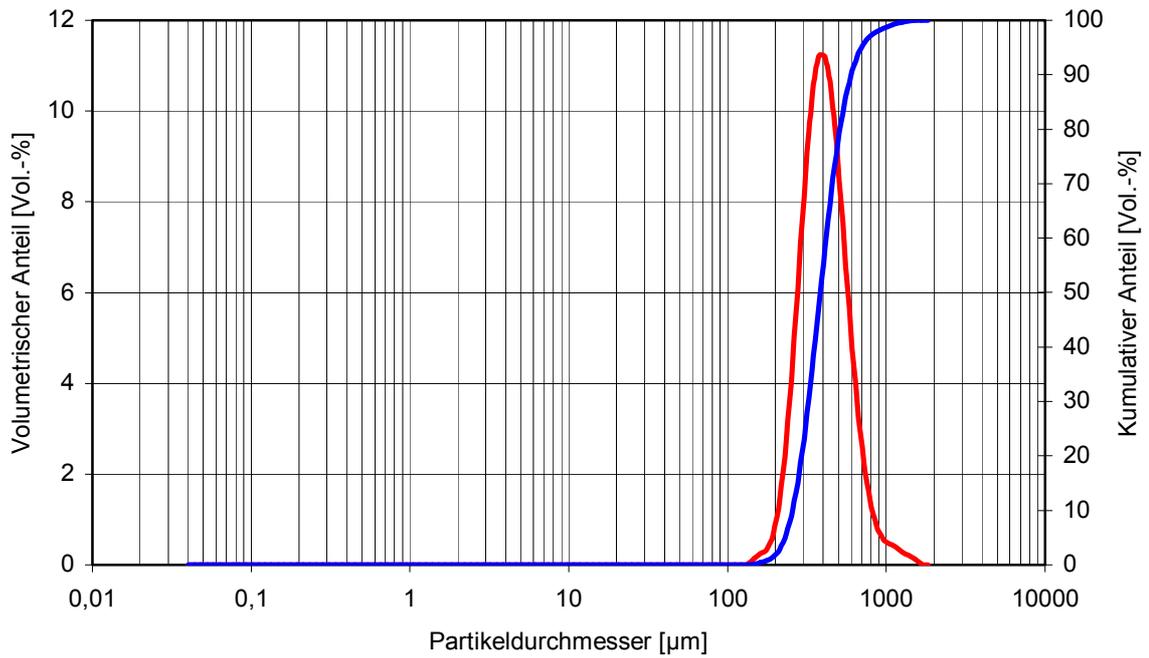
## Calibrit



Statistische Werte:		
<b>Mittelwert:</b>	36,67	[µm]
<b>Standardabweichung:</b>	31,12	[µm]
<b>Variationskoeffizient:</b>	84,87	[%]
<b>d<sub>10</sub>:</b>	5,204	[µm]
<b>d<sub>50</sub>:</b>	31,28	[µm]
<b>d<sub>90</sub>:</b>	68,68	[µm]
<b>Spezifische Oberfläche:</b>	12786	[cm <sup>2</sup> /ml]
<b>Maximum:</b>	37,97	[µm]
<b>Varianz:</b>	968,5	[µm <sup>2</sup> ]

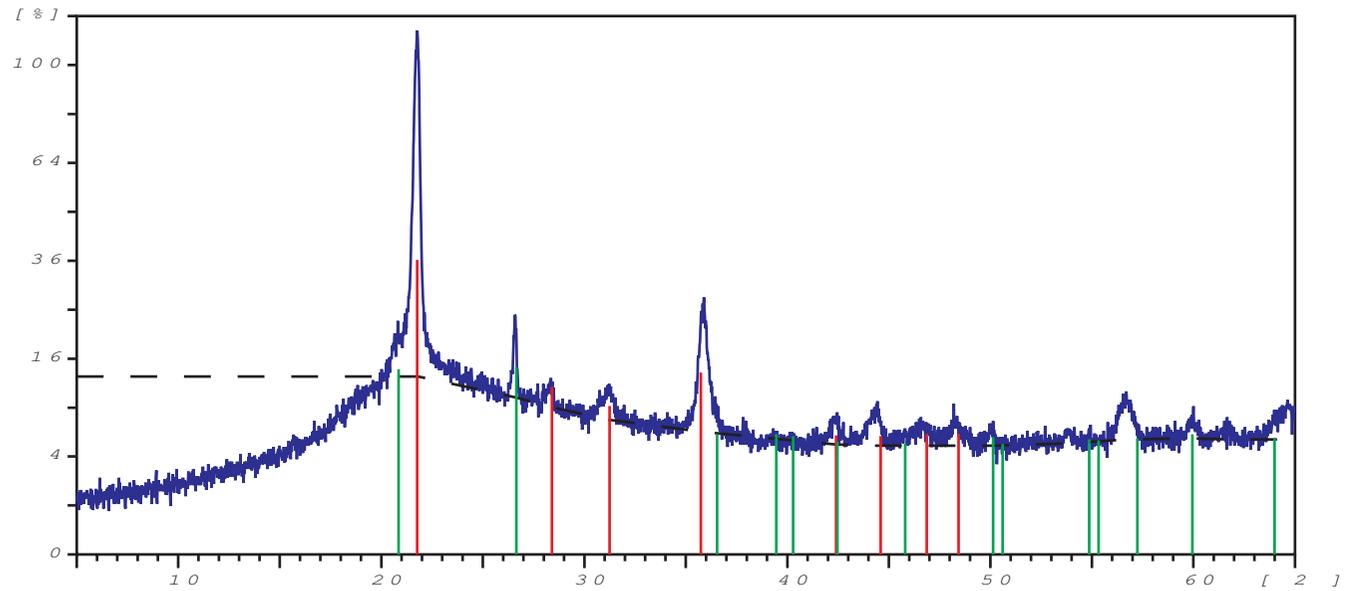
A. 17.1: Korngrößenverteilung Calibrit

## Quarzsand H31



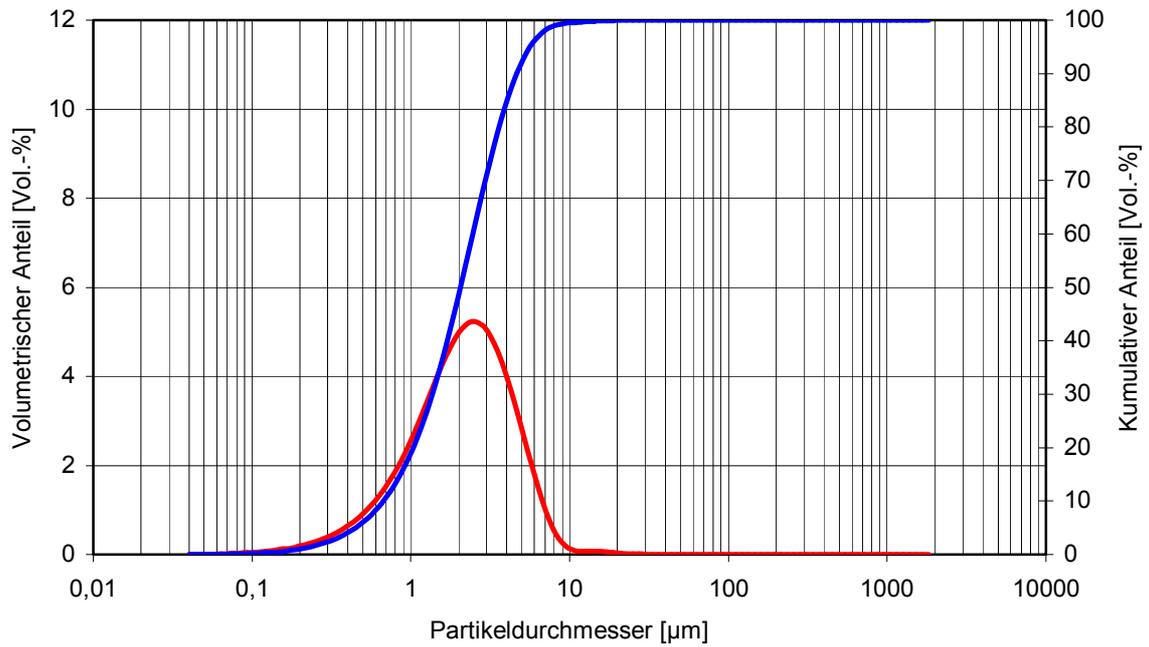
Statistische Werte:		
<b>Mittelwert:</b>	454,6	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Standardabweichung:</b>	176,7	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Variationskoeffizient:</b>	38,88	[%]
<b><math>d_{10}</math>:</b>	280,7	[ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>d_{50}</math>:</b>	420,6	[ $\mu\text{m}$ ]
<b><math>d_{90}</math>:</b>	657,7	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Spezifische Oberfläche:</b>	148,8	[ $\text{cm}^2/\text{ml}$ ]
<b>Maximum:</b>	429,2	[ $\mu\text{m}$ ]
<b>Varianz:</b>	31237	[ $\mu\text{m}^2$ ]

A. 18.1: Korngrößenverteilung Quarzsand H31



A. 19.1: Röntgenogramm Kieselgur

## Omyacarb 2BG



Statistische Werte:		
<b>Mittelwert:</b>	2,692	[µm]
<b>Standardabweichung:</b>	2,019	[µm]
<b>Variationskoeffizient:</b>	75,03	[%]
<b>d<sub>10</sub>:</b>	0,74	[µm]
<b>d<sub>50</sub>:</b>	2,259	[µm]
<b>d<sub>90</sub>:</b>	5,102	[µm]
<b>Spezifische Oberfläche:</b>	41927	[cm <sup>2</sup> /ml]
<b>Maximum:</b>	2,539	[µm]
<b>Varianz:</b>	4,078	[µm <sup>2</sup> ]

A. 20.1: Korngrößenverteilung Omyacarb 2BG

	Ausbreitmaße 10 Min. nach Ende Herstellung [cm]	Ausbreitmaß 25 Min. nach Ende Herstellung [cm]	Ausbreitmaß 40 Min. nach Ende Herstellung [cm]
M 1:4 20 F	25,0/25,5	23,0/22,5	22,5/21,5
M 1:2 30 FLP	23,5/23,5	21,0/21,5	18,5/19,0
M 1:4 30 F	25,0/26,0	22,0/22,5	-

A. 21.1: Verarbeitungszeit der Favoritenmischungen

	Luftporengehalt [%]	Luftporengehalt [%]	Mittelwert Luftporengehalt [%]
M 1:2 20 F	2,9	2,8	2,9
M 1:2 20 FLP	24	20	22
M 1:2 20	0,6	0,5	0,6
M 1:3 20 F	3,1	3,1	3,1
M 1:3 20 FLP	12	12,2	12,1
M 1:3 20	0,7	0,6	0,7
M 1:4 20 F	3,2	3,1	3,2
M 1:4 20 FLP	15	15,2	15,1
M 1:4 20	0,4	0,4	0,4
M 1:2 30 F	3	2,9	3
M 1:2 30 FLP	11	10	10,5
M 1:2 30	0,2	0,2	0,2
M 1:3 30 F	3,2	3,2	3,2
M 1:3 30 FLP	12	12,2	12,1
M 1:3 30	0,2	0,2	0,2
M 1:4 30 F	3,3	3,2	3,3
M 1:4 30 FLP	10,5	13	11,8
M 1:4 30	0,2	0,2	0,2

A. 21.3: Luftporengehalte der gewählten Mischungen

	m <sub>3</sub> [g]	m <sub>5</sub> [g]	m <sub>4</sub> [g]	m <sub>6</sub> [g]	Zement [g]	Kaolin [g]	H 31 [g]	Calibrit [g]	Wasser [g]	m <sub>1</sub> +m <sub>2</sub>	W <sub>1</sub>	m <sub>3</sub>	W <sub>1</sub> *m <sub>3</sub>	W <sub>3</sub>	WRV [%]
<b>M 1:2 20 F</b>	1277,9	22,30	1670,6	23,52	200	50	300	200	360	1110	0,3243	392,7	127,36	1,22	<b>99,04</b>
<b>M 1:2 20 FLP</b>	1022,0	22,32	1574,5	23,00	200	50	300	200	384	1134	0,3386	552,5	187,09	0,68	<b>99,64</b>
<b>M 1:2 20</b>	1335,5	79,80	1713,2	88,00	200	50	300	200	720	1470	0,4898	377,7	185,00	8,20	<b>95,57</b>
<b>M 1:3 20 F</b>	1056,3	22,27	1664,4	23,30	160	40	360	240	351	1151	0,3050	608,1	185,44	1,03	<b>99,44</b>
<b>M 1:3 20 FLP</b>	1687,3	42,61	2031,0	43,90	160	40	360	240	351	1151	0,3050	343,7	104,81	1,29	<b>98,77</b>
<b>M 1:3 20</b>	1688,3	38,00	2049,6	46,00	160	40	360	240	702	1502	0,4674	361,3	168,86	8,00	<b>95,26</b>
<b>M 1:4 20 F</b>	1565,4	32,44	2062,0	33,50	120	30	360	240	327	1077	0,3036	496,6	150,78	1,06	<b>99,30</b>
<b>M 1:4 20 FLP</b>	1681,5	30,10	2021,0	31,10	120	30	360	240	330	1080	0,3056	339,5	103,74	1,00	<b>99,04</b>
<b>M 1:4 20</b>	1696,6	44,20	2061,6	56,38	120	30	360	240	591	1341	0,4407	365,0	160,86	12,18	<b>92,43</b>
<b>M 1:2 30 F</b>	1691,8	40,35	2066,0	41,66	175	75	300	200	375	1125	0,3333	374,2	124,73	1,31	<b>98,95</b>
<b>M 1:2 30 FLP</b>	1694,1	42,50	2057,9	43,70	175	75	300	200	375	1125	0,3333	363,8	121,27	1,20	<b>99,01</b>
<b>M 1:2 30</b>	1700,1	49,10	2056,1	57,50	175	75	300	200	750	1500	0,5000	356,0	178,00	8,40	<b>95,28</b>
<b>M 1:3 30 F</b>	1693,6	38,76	2091,0	40,10	140	60	360	240	363	1163	0,3121	397,4	124,04	1,34	<b>98,92</b>
<b>M 1:3 30 FLP</b>	1700,1	49,10	2043,9	50,40	140	60	360	240	366	1166	0,3139	343,8	107,92	1,30	<b>98,80</b>
<b>M 1:3 30</b>	1706,4	54,32	2070,7	63,20	140	60	360	240	720	1520	0,4737	364,3	172,56	8,88	<b>94,85</b>
<b>M 1:4 30 F</b>	1718,8	67,80	2095,6	69,80	105	45	360	240	327	1077	0,3036	376,8	114,40	2,00	<b>98,25</b>
<b>M 1:4 30 FLP</b>	1707,3	60,80	2083,7	61,50	105	45	360	240	330	1080	0,3056	376,4	115,01	0,70	<b>99,39</b>
<b>M 1:4 30</b>	1701,2	66,17	2076,3	76,50	105	45	360	240	630	1380	0,4565	375,1	171,24	10,33	<b>93,97</b>

A. 22.1: Wasserrückhaltevermögen

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:2 20 F	A	2,152	4,18	2,074	3,97	2,060	3,38
M 1:2 20 F	B	2,129	4,71	2,070	4,77	2,083	4,06
M 1:2 20 F	C	2,125	4,06	2,045	5,32	2,061	3,51
Mittelwerte							
M 1:2 20 F		2,135	<b>4,32</b>	2,063	<b>4,69</b>	2,068	<b>3,65</b>

A. 23.1: Biegezugfestigkeiten M 1:2 20 F

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:2 20 FLP	A	1,570	2,01	1,548	2,52	1,644	2,90
M 1:2 20 FLP	B	1,574	1,83	1,565	2,00	1,615	2,39
M 1:2 20 FLP	C	1,568	2,01	1,573	2,95	1,605	2,52
Mittelwerte							
M 1:2 20 FLP		1,571	<b>1,95</b>	1,562	<b>2,49</b>	1,621	<b>2,60</b>

A. 23.2: Biegezugfestigkeiten M 1:2 20 F

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:2 20	A	1,870	1,19	1,814	1,74	1,754	2,63
M 1:2 20	B	1,881	1,30	1,821	1,52	1,752	1,12
M 1:2 20	C	1,877	1,42	1,799	1,41	1,741	2,10
Mittelwerte							
M 1:2 20		1,876	<b>1,30</b>	1,811	<b>1,56</b>	1,749	<b>1,95</b>

A. 23.3: Biegezugfestigkeiten M 1:2 20

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	β <sub>BZ</sub> 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:3 20 F	A	2,061	4,53	2,035	4,74	2,011	3,94
M 1:3 20 F	B	2,102	4,24	2,005	3,76	2,073	4,80
M 1:3 20 F	C	2,072	3,95	2,027	4,30	2,040	4,71
Mittelwerte							
M 1:3 20 F		2,078	<b>4,24</b>	2,022	<b>4,27</b>	2,041	<b>4,48</b>

A. 23.4: Biegezugfestigkeiten M 1:3 20 F

	Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:3 20 FLP A	-	-	1,798	2,95	1,817	3,92
M 1:3 20 FLP B	1,885	2,77	1,748	2,71	1,818	3,79
M 1:3 20 FLP C	1,333	3,12	1,803	3,26	1,810	3,59
<b>Mittelwerte</b>						
M 1:3 20 FLP	1,609	<b>2,95</b>	1,783	<b>2,97</b>	1,815	<b>3,77</b>

A. 24.1: Biegezugfestigkeiten M 1:3 20 FLP

	Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:3 20 A	1,875	0,83	1,833	1,52	1,718	2,21
M 1:3 20 B	1,920	0,95	1,876	1,64	1,766	2,00
M 1:3 20 C	1,879	0,89	1,842	1,24	1,773	2,57
<b>Mittelwerte</b>						
M 1:3 20	1,891	<b>0,89</b>	1,850	<b>1,47</b>	1,752	<b>2,26</b>

A. 24.2: Biegezugfestigkeiten M 1:3 20

	Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:4 20 F A	1,870	1,19	1,814	1,74	2,185	5,85
M 1:4 20 F B	1,881	1,30	1,821	1,52	2,051	5,15
M 1:4 20 F C	1,877	1,42	1,799	1,41	2,048	5,40
<b>Mittelwerte</b>						
M 1:4 20 F	1,876	<b>1,30</b>	1,811	<b>1,56</b>	2,095	<b>5,47</b>

A. 24.3: Biegezugfestigkeiten M 1:4 20 F

	Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:4 20 FLP A	1,787	1,71	1,773	4,07	1,733	4,50
M 1:4 20 FLP B	1,826	1,89	1,793	2,33	1,750	3,94
M 1:4 20 FLP C	1,788	1,89	1,756	2,39	1,731	4,53
<b>Mittelwerte</b>						
M 1:4 20 FLP	1,800	<b>1,83</b>	1,774	<b>2,93</b>	1,738	<b>4,32</b>

A. 24.4: Biegezugfestigkeiten M 1:4 20 FLP

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:4 20	A	1,981	0,54	1,883	1,30	1,779	2,8
M 1:4 20	B	1,980	0,78	1,912	1,48	1,792	2,77
M 1:4 20	C	1,973	0,78	1,883	1,30	1,775	2,89
<b>Mittelwerte</b>							
M 1:4 20		1,978	<b>0,70</b>	1,893	<b>1,36</b>	1,782	<b>2,82</b>

A. 25.1: Biegezugfestigkeiten M 1:4 20

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:2 30 F	A	2,094	4,06	2,064	3,96	2,059	3,14
M 1:2 30 F	B	-	-	2,073	5,18	2,073	2,81
M 1:2 30 F	C	-	-	2,023	3,99	2,036	3,21
<b>Mittelwerte</b>							
M 1:2 30 F		2,094	<b>4,06</b>	2,053	<b>4,38</b>	2,056	<b>3,05</b>

A. 25.2: Biegezugfestigkeiten M 1:2 30 F

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:2 30 FLP	A	1,801	2,18	1,927	3,73	1,882	3,23
M 1:2 30 FLP	B	1,819	2,77	1,917	4,31	1,907	3,57
M 1:2 30 FLP	C	1,819	2,65	1,882	4,45	1,889	3,04
<b>Mittelwerte</b>							
M 1:2 30 FLP		1,813	<b>2,53</b>	1,909	<b>4,16</b>	1,893	<b>3,28</b>

A. 25.3: Biegezugfestigkeiten M 1:2 30 FLP

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:2 30	A	1,830	1,19	1,846	1,82	1,714	1,90
M 1:2 30	B	1,840	1,13	1,865	2,10	1,739	1,38
M 1:2 30	C	1,834	0,95	1,855	2,10	1,700	0,84
<b>Mittelwerte</b>							
M 1:2 30		1,835	<b>1,09</b>	1,855	<b>2,01</b>	1,718	<b>1,37</b>

A. 25.4: Biegezugfestigkeiten M 1:2 30

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:3 30 F	A	2,112	3,24	2,284	5,29	2,034	3,49
M 1:3 30 F	B	2,076	2,89	2,334	5,35	2,031	3,93
M 1:3 30 F	C	2,085	2,71	1,708	3,90	3,019	3,36
Mittelwerte							
M 1:3 30 F		2,091	<b>2,95</b>	2,109	<b>4,85</b>	2,361	<b>3,59</b>

A. 26.1: Biegezugfestigkeiten M 1:3 30 F

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:3 30 FLP	A	1,887	2,89	1,893	3,97	1,834	3,11
M 1:3 30 FLP	B	1,882	2,95	1,917	3,89	1,815	3,44
M 1:3 30 FLP	C	1,850	2,77	1,894	3,87	1,818	3,37
Mittelwerte							
M 1:3 30 FLP		1,873	<b>2,87</b>	1,901	<b>3,91</b>	1,822	<b>3,31</b>

A. 26.2: Biegezugfestigkeiten M 1:3 30 FLP

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:3 30	A	1,907	0,60	1,882	1,64	1,706	1,06
M 1:3 30	B	1,928	0,60	1,888	2,36	1,696	0,99
M 1:3 30	C	1,922	0,60	1,880	1,98	1,676	0,88
Mittelwerte							
M 1:3 30		1,919	<b>0,60</b>	1,883	<b>1,99</b>	1,693	<b>0,98</b>

A. 26.3: Biegezugfestigkeiten M 1:3 30

		Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:4 30 F	A	2,125	2,48	2,090	4,09	2,053	3,83
M 1:4 30 F	B	2,109	2,54	2,121	4,46	2,103	5,54
M 1:4 30 F	C	2,134	2,24	2,094	3,48	2,079	4,29
Mittelwerte							
M 1:4 30 F		2,123	<b>2,42</b>	2,102	<b>4,01</b>	2,078	<b>4,55</b>

A. 26.4: Biegezugfestigkeiten M 1:4 30 F

	Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:4 30 FLP A	1,873	1,77	1,964	2,96	1,863	3,45
M 1:4 30 FLP B	1,854	1,77	1,957	3,40	1,849	3,39
M 1:4 30 FLP C	1,819	1,60	1,975	2,89	1,864	4,04
<b>Mittelwerte</b> M 1:4 30 FLP	1,849	<b>1,71</b>	1,965	<b>3,08</b>	1,859	<b>3,63</b>

A. 27.1: Biegezugfestigkeiten M 1:4 30 FLP

	Dichte 2 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 2 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 7 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 7 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]	Dichte 28 Tage [ g/cm <sup>3</sup> ]	$\beta_{BZ}$ 28 Tage [N/mm <sup>2</sup> ]
M 1:4 30 A	1,961	0,48	1,930	1,44	1,729	1,66
M 1:4 30 B	1,948	0,48	1,937	1,38	1,748	1,35
M 1:4 30 C	1,952	0,49	1,912	1,91	1,739	2,01
<b>Mittelwerte</b> M 1:4 30	1,954	<b>0,48</b>	1,926	<b>1,58</b>	1,739	<b>1,67</b>

A. 27.2: Biegezugfestigkeiten M 1:4 30

M 1:2 20 F: mittlere Dichte (nach 28 Tagen): 2,068 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	29,44	52,37	72,20
A - 2	31,01	53,77	73,10
B - 1	26,28	53,66	69,30
B - 2	29,62	51,66	74,20
C - 1	24,40	47,65	74,90
C - 2	28,34	51,77	74,80
<b>Mittelwerte M 1:2 20 F</b>	<b>28,18</b>	<b>51,81</b>	<b>73,08</b>

A. 28.1: Druckfestigkeiten M 1:2 20 F

M 1:2 20 FLP: mittlere Dichte (nach 28 Tagen): 1,621 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	10,04	20,27	30,02
A - 2	8,92	19,19	33,16
B - 1	8,77	20,32	29,70
B - 2	8,31	20,48	23,04
C - 1	9,73	20,64	27,88
C - 2	9,10	19,56	30,22
<b>Mittelwerte M 1:2 20 FLP</b>	<b>9,15</b>	<b>20,08</b>	<b>29,00</b>

A. 28.2: Druckfestigkeiten M 1:2 20 FLP

M 1:2 20: mittlere Dichte (nach 28 Tagen): 1,749 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	4,20	12,33	28,79
A - 2	4,51	12,80	26,23
B - 1	4,35	12,12	27,09
B - 2	3,88	12,41	24,71
C - 1	4,19	12,27	25,19
C - 2	3,89	12,45	22,18
<b>Mittelwerte M 1:2 20</b>	<b>4,17</b>	<b>12,40</b>	<b>25,70</b>

A. 28.3: Druckfestigkeiten M 1:2 20

M 1:3 20 F: mittlere Dichte (nach 28 Tagen): 2,041 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	22,18	41,95	66,8
A - 2	19,02	39,31	63,9
B - 1	22,82	40,98	62,4
B - 2	22,98	39,75	57,9
C - 1	23,60	40,98	59,8
C - 2	21,08	41,92	62,4
<b>Mittelwerte M 1:3 20 F</b>	<b>21,95</b>	<b>40,82</b>	<b>62,2</b>

A. 29.1: Druckfestigkeiten M 1:3 20 F

M 1:3 20 FLP: mittlere Dichte (nach 28 Tagen): 1,815 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	14,45	25,05	38,75
A - 2	12,87	26,44	38,77
B - 1	14,15	26,44	39,07
B - 2	14,75	22,28	40,00
C - 1	14,75	26,12	35,75
C - 2	13,35	26,26	34,33
<b>Mittelwerte M 1:3 20 FLP</b>	<b>14,05</b>	<b>25,43</b>	<b>37,78</b>

A. 29.2: Druckfestigkeiten M 1:3 20 FLP

M 1:3 20: mittlere Dichte (nach 28 Tagen): 1,752 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	2,14	8,96	16,08
A - 2	2,62	8,66	16,36
B - 1	2,79	8,84	17,46
B - 2	2,47	9,31	16,96
C - 1	2,31	9,48	16,92
C - 2	2,62	9,50	18,37
<b>Mittelwerte M 1:3 20</b>	<b>2,49</b>	<b>9,13</b>	<b>17,03</b>

A. 29.3: Druckfestigkeiten M 1:3 20

M 1:4 20 F mittlere Dichte (nach 28 Tagen): 2,095 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	14,61	32,56	52,31
A - 2	15,52	32,59	51,38
B - 1	12,39	32,93	50,26
B - 2	11,46	33,25	49,92
C - 1	13,50	31,79	48,86
C - 2	14,94	32,57	51,06
<b>Mittelwerte M 1:4 20 F</b>	<b>13,74</b>	<b>32,62</b>	<b>50,63</b>

A. 30.1: Druckfestigkeiten M 1:4 20 F

M 1:4 20 FLP: mittlere Dichte (nach 28 Tagen): 1,738 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	7,50	18,81	30,08
A - 2	7,51	18,20	27,70
B - 1	7,97	19,10	29,61
B - 2	8,46	19,10	28,02
C - 1	7,98	18,82	28,36
C - 2	8,30	16,78	28,64
<b>Mittelwerte M 1:4 20 FLP</b>	<b>7,95</b>	<b>18,47</b>	<b>28,74</b>

A. 30.2: Druckfestigkeiten M 1:4 20 FLP

M 1:4 20: mittlere Dichte (nach 28 Tagen): 1,782 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	1,98	7,03	16,02
A - 2	2,31	6,88	15,08
B - 1	2,15	7,20	14,62
B - 2	2,14	7,36	14,44
C - 1	2,14	6,72	4,92
C - 2	2,30	7,08	14,45
<b>Mittelwerte M 1:4 20</b>	<b>2,17</b>	<b>7,05</b>	<b>13,26</b>

A. 30.3: Druckfestigkeiten M 1:4 20

M 1:2 30 F: mittlere Dichte ( nach 28 Tagen ): 2,056 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	20,76	50,99	64,36
A - 2	21,24	53,73	60,00
B - 1	21,87	54,06	69,50
B - 2	21,26	51,06	65,00
C - 1	19,51	53,19	63,90
C - 2	21,24	51,68	65,60
<b>Mittelwerte M 1:2 30 F</b>	<b>20,98</b>	<b>52,45</b>	<b>64,73</b>

A. 31.1: Druckfestigkeiten M 1:2 30 F

M 1:2 30 FLP: mittlere Dichte ( nach 28 Tagen ): 1,893 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	13,50	40,68	49,10
A - 2	14,45	43,68	55,10
B - 1	14,28	40,05	53,27
B - 2	13,97	38,31	54,42
C - 1	15,56	38,89	48,74
C - 2	15,24	39,69	47,55
<b>Mittelwerte M 1:2 30 FLP</b>	<b>14,50</b>	<b>40,22</b>	<b>51,36</b>

A. 31.2: Druckfestigkeiten M 1:2 30 FLP

M 1:2 30: mittlere Dichte ( nach 28 Tagen ): 1,718 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	3,41	12,44	22,95
A - 2	3,26	12,60	21,94
B - 1	3,42	12,49	23,44
B - 2	3,40	12,79	23,43
C - 1	3,25	12,31	20,91
C - 2	3,26	12,30	13,89
<b>Mittelwerte M 1:2 30</b>	<b>3,33</b>	<b>12,49</b>	<b>21,09</b>

A. 31.3: Druckfestigkeiten M 1:2 30

M 1:3 30 F mittlere Dichte ( nach 28 Tagen ): 2,361 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	14,93	50,99	62,51
A - 2	14,93	53,73	60,74
B - 1	15,09	54,06	62,51
B - 2	13,19	51,06	64,10
C - 1	14,60	53,19	59,20
C - 2	14,65	51,68	60,80
<b>Mittelwerte M 1:3 30 F</b>	<b>14,57</b>	<b>52,45</b>	<b>61,64</b>

A. 32.1: Druckfestigkeiten M 1:3 30 F

M 1:3 30 FLP: mittlere Dichte ( nach 28 Tagen ): 1,822 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	11,93	31,09	37,70
A - 2	12,29	29,03	40,24
B - 1	11,78	32,46	41,46
B - 2	11,93	31,20	37,44
C - 1	11,80	31,38	40,49
C - 2	11,95	29,50	41,14
<b>Mittelwerte M 1:3 30 FLP</b>	<b>11,95</b>	<b>30,78</b>	<b>39,75</b>

A. 32.2: Druckfestigkeiten M 1:3 30 FLP

M 1:3 30: mittlere Dichte ( nach 28 Tagen ): 1,693 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	1,83	9,28	16,26
A - 2	1,83	9,12	14,37
B - 1	1,67	9,34	15,81
B - 2	1,67	9,65	15,63
C - 1	1,67	8,40	15,15
C - 2	1,66	9,35	14,91
<b>Mittelwerte M 1:3 30</b>	<b>1,72</b>	<b>9,19</b>	<b>15,36</b>

A. 32.3: Druckfestigkeiten M 1:3 30

M 1:4 30 F: mittlere Dichte ( nach 28 Tagen ): 2,078 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	11,15	33,17	51,14
A - 2	12,22	34,27	53,45
B - 1	11,00	34,17	55,72
B - 2	11,61	33,21	52,87
C - 1	12,08	32,92	51,14
C - 2	11,60	34,09	52,36
<b>Mittelwerte M 1:4 30 F</b>	<b>11,61</b>	<b>33,64</b>	<b>52,78</b>

A. 33.1: Druckfestigkeiten M 1:4 30 F

M 1:4 30 FLP: mittlere Dichte ( nach 28 Tagen ): 1,859 g/cm<sup>3</sup>

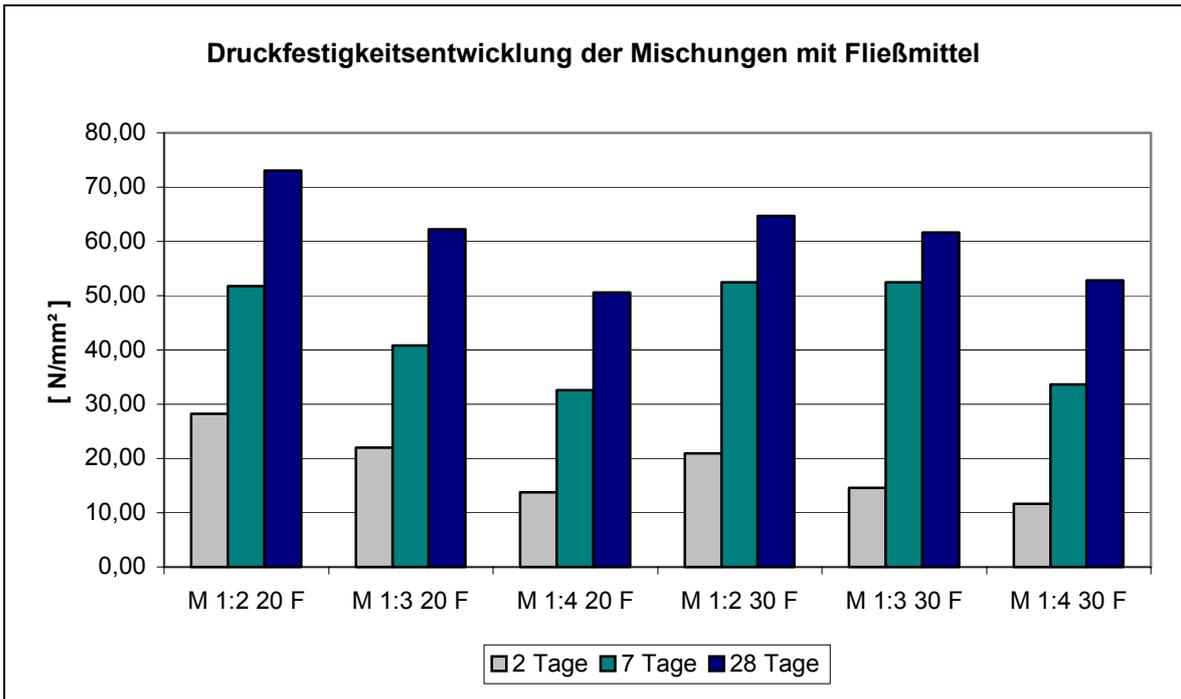
	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	7,51	26,20	36,77
A - 2	7,97	25,89	35,81
B - 1	7,51	25,85	38,11
B - 2	7,51	26,80	34,95
C - 1	7,83	25,56	35,56
C - 2	7,34	26,80	34,14
<b>Mittelwerte M 1:4 30 FLP</b>	<b>7,61</b>	<b>26,18</b>	<b>35,89</b>

A. 33.2: Druckfestigkeiten M 1:4 30 FLP

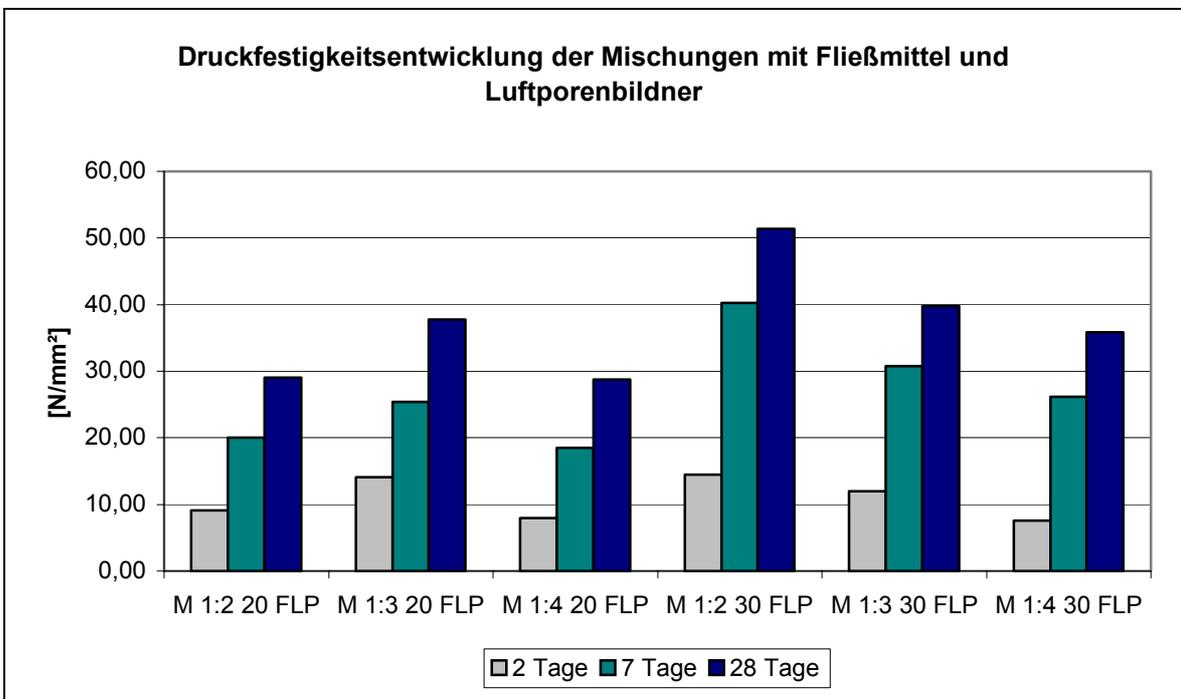
M 1:4 30: mittlere Dichte ( nach 28 Tagen ): 1,739 g/cm<sup>3</sup>

	$\beta_D$ nach 2 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 7 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]	$\beta_D$ nach 28 Tagen [ N/mm <sup>2</sup> ]
A - 1	1,35	6,66	12,06
A - 2	1,35	6,03	12,52
B - 1	1,35	6,59	13,64
B - 2	1,19	6,43	13,48
C - 1	1,35	6,29	12,54
C - 2	1,36	6,45	12,39
<b>Mittelwerte M 1:4 30</b>	<b>1,33</b>	<b>6,41</b>	<b>12,77</b>

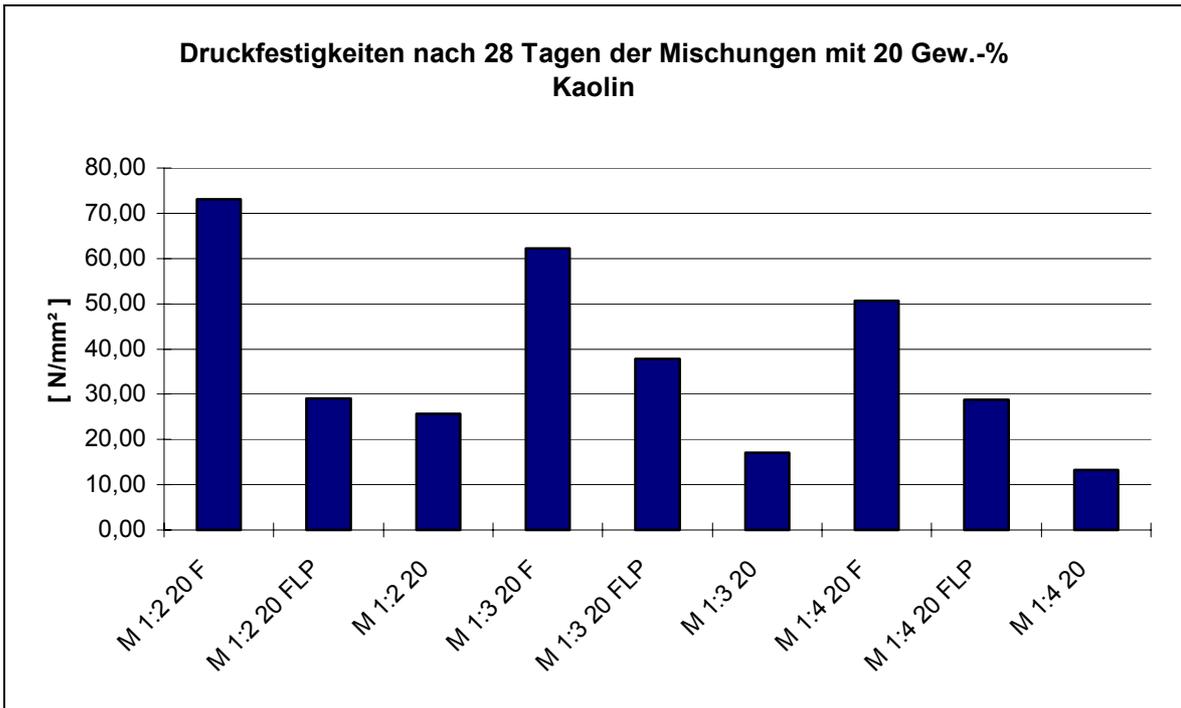
A. 33.3: Druckfestigkeiten M 1:4 30



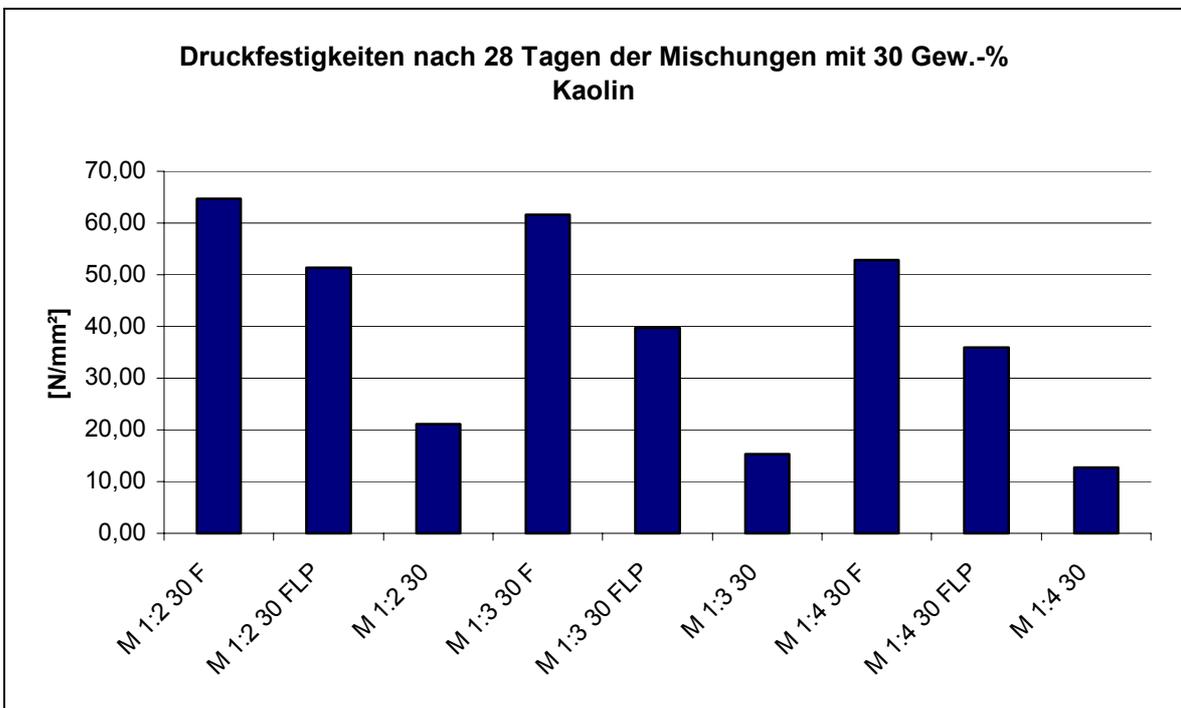
A. 34.1: Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit Fließmittel



A. 34.2: Druckfestigkeitsentwicklung der Mischungen mit Fließmittel und Luftporenbildner



A. 35.1: Druckfestigkeiten nach 28 Tagen der Mischungen mit 20 Gew.-% Kaolin



A. 35.2: Druckfestigkeiten nach 28 Tagen der Mischungen mit 30 Gew.-% Kaolin

**Probe: M 1:2 20 F A**

Länge: 159,66 mm  
 Breite: 39,94 mm  
 Tiefe: 39,90 mm  
 Fläche: 1593,61 mm<sup>2</sup>  
 Masse: 524,03 g  
 Volumen: 254,44 cm<sup>3</sup>  
 Dichte: **2,060 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	40,4	3952	29,0
2	39,9	4002	29,7
3	41,0	3894	28,1
4	41,0	3894	28,1
<b>Mittelwerte</b>	40,6	<b>3935</b>	<b>28,7</b>

**Probe: M 1:2 20 F B**

Länge: 159,37 mm  
 Breite: 39,77 mm  
 Tiefe: 39,75 mm  
 Fläche: 1580,86 mm<sup>2</sup>  
 Masse: 524,90 g  
 Volumen: 251,94 cm<sup>3</sup>  
 Dichte: **2,083 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	40,5	3935	29,0
2	40,5	3935	29,0
3	40,5	3935	29,0
4	40,5	3935	29,0
<b>Mittelwerte</b>	40,5	<b>3935</b>	<b>29,0</b>

**Probe: M 1:2 20 F C**

Länge: 159,24 mm  
 Breite: 40,45 mm  
 Tiefe: 39,89 mm  
 Fläche: 1613,55 mm<sup>2</sup>  
 Masse: 529,60 g  
 Volumen: 256,94 cm<sup>3</sup>  
 Dichte: **2,061 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	40,5	3932	28,7
2	40,5	3932	28,7
3	40,4	3942	28,8
4	40,5	3932	28,7
<b>Mittelwerte</b>	40,5	<b>3934</b>	<b>28,7</b>

**Mischung 1:2 20 F: Dichte: 2,068 g/cm<sup>3</sup>**

**Dynamischer E-Modul: 28,8 KN/mm<sup>2</sup>**

A.36.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 20 F

**Probe: M 1:2 20 FLP A**

Länge: 159,44 mm  
Breite: 39,87 mm  
Tiefe: 40,00 mm  
Fläche: 1594,80 mm<sup>2</sup>  
Masse: 418,14 g  
Volumen: 254,27 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,644 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	47,5	3357	16,7
2	47,6	3350	16,6
3	47,5	3357	16,7
4	47,2	3378	16,9
<b>Mittelwerte</b>	47,5	<b>3360</b>	<b>16,7</b>

**Probe: M 1:2 20 FLP B**

Länge: 159,39 mm  
Breite: 40,67 mm  
Tiefe: 39,90 mm  
Fläche: 1622,73 mm<sup>2</sup>  
Masse: 417,60 g  
Volumen: 258,65 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,615 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	47,5	3356	16,4
2	47,6	3349	16,3
3	47,5	3356	16,4
4	47,6	3349	16,3
<b>Mittelwerte</b>	47,6	<b>3352</b>	<b>16,3</b>

**Probe: M 1:2 20 FLP C**

Länge: 159,55 mm  
Breite: 40,43 mm  
Tiefe: 40,18 mm  
Fläche: 1624,48 mm<sup>2</sup>  
Masse: 416,10 g  
Volumen: 259,19 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,605 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	47,5	3359	16,3
2	47,6	3352	16,2
3	47,8	3338	16,1
4	47,3	3373	16,4
<b>Mittelwerte</b>	47,6	<b>3355</b>	<b>16,3</b>

Mischung 1:2 20 FLP: Dichte: **1,621 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **16,4 KN/mm<sup>2</sup>**

A.37.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 20 FLP

**Probe: M 1:2 20 A**

Länge: 159,21 mm  
 Breite: 40,55 mm  
 Tiefe: 39,83 mm  
 Fläche: 1615,11 mm<sup>2</sup>  
 Masse: 451,00 g  
 Volumen: 257,14 cm<sup>3</sup>  
 Dichte: **1,754 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	53,4	2981	14,0
2	53,6	2970	13,9
3	53,5	2976	14,0
4	53,2	2993	14,1
<b>Mittelwerte</b>	<b>53,4</b>	<b>2980</b>	<b>14,0</b>

**Probe: M 1:2 20 B**

Länge: 159,11 mm  
 Breite: 40,32 mm  
 Tiefe: 39,92 mm  
 Fläche: 1609,57 mm<sup>2</sup>  
 Masse: 448,60 g  
 Volumen: 256,10 cm<sup>3</sup>  
 Dichte: **1,752 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	53,5	2974	13,9
2	53,6	2968	13,9
3	53,5	2974	13,9
4	53,6	2968	13,9
<b>Mittelwerte</b>	<b>53,6</b>	<b>2971</b>	<b>13,9</b>

**Probe: M 1:2 20 C**

Länge: 159,56 mm  
 Breite: 40,53 mm  
 Tiefe: 39,89 mm  
 Fläche: 1616,74 mm<sup>2</sup>  
 Masse: 449,10 g  
 Volumen: 257,97 cm<sup>3</sup>  
 Dichte: **1,741 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	53,1	3005	14,1
2	52,4	3045	14,5
3	54,0	2955	13,7
4	54,1	2949	13,6
<b>Mittelwerte</b>	<b>53,4</b>	<b>2989</b>	<b>14,0</b>

Mischung 1:2 20 : Dichte: **1,749 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **14,0 KN/mm<sup>2</sup>**

A.38.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 20

**Probe: M 1:3 20 F A**

Länge: 159,46 mm  
Breite: 41,97 mm  
Tiefe: 39,95 mm  
Fläche: 1676,70 mm<sup>2</sup>  
Masse: 537,80 g  
Volumen: 267,37 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,011 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	40,5	3937	28,1
2	40,2	3967	28,5
3	40,5	3937	28,1
4	40,6	3928	27,9
<b>Mittelwerte</b>	40,5	<b>3942</b>	<b>28,1</b>

**Probe: M 1:3 20 F B**

Länge: 159,87 mm  
Breite: 40,49 mm  
Tiefe: 39,99 mm  
Fläche: 1619,20 mm<sup>2</sup>  
Masse: 536,50 g  
Volumen: 258,86 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,073 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	40,8	3918	28,6
2	41,1	3890	28,2
3	40,5	3947	29,1
4	40,5	3947	29,1
<b>Mittelwerte</b>	40,7	<b>3926</b>	<b>28,7</b>

**Probe: M 1:3 20 F C**

Länge: 160,09 mm  
Breite: 40,85 mm  
Tiefe: 40,01 mm  
Fläche: 1634,41 mm<sup>2</sup>  
Masse: 533,80 g  
Volumen: 261,65 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,040 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	40,5	3953	28,7
2	40,7	3933	28,4
3	40,7	3933	28,4
4	40,5	3953	28,7
<b>Mittelwerte</b>	40,6	<b>3943</b>	<b>28,5</b>

Mischung 1:3 20 F : Dichte: **2,041 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **28,5 KN/mm<sup>2</sup>**

A.39.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 20 F

**Probe: M 1:3 20 FLP A**

Länge: 159,44 mm  
Breite: 40,48 mm  
Tiefe: 39,89 mm  
Fläche: 1614,75 mm<sup>2</sup>  
Masse: 467,70 g  
Volumen: 257,46 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,817 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	44,3	3599	21,2
2	44,7	3567	20,8
3	44,9	3551	20,6
4	44,7	3567	20,8
<b>Mittelwerte</b>	<b>44,7</b>	<b>3571</b>	<b>20,8</b>

**Probe: M 1:3 20 FLP B**

Länge: 159,34 mm  
Breite: 40,54 mm  
Tiefe: 39,92 mm  
Fläche: 1618,36 mm<sup>2</sup>  
Masse: 468,90 g  
Volumen: 257,87 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,818 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	44,1	3613	21,4
2	44,2	3605	21,3
3	44,2	3605	21,3
4	44,1	3613	21,4
<b>Mittelwerte</b>	<b>44,2</b>	<b>3609</b>	<b>21,3</b>

**Probe: M 1:3 20 FLP C**

Länge: 159,46 mm  
Breite: 40,31 mm  
Tiefe: 39,88 mm  
Fläche: 1607,56 mm<sup>2</sup>  
Masse: 464,10 g  
Volumen: 256,34 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,810 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu\text{s}$ ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	44,3	3600	21,1
2	44,5	3583	20,9
3	44,4	3591	21,0
4	44,3	3600	21,1
<b>Mittelwerte</b>	<b>44,4</b>	<b>3593</b>	<b>21,0</b>

Mischung 1:3 20 F : Dichte: **1,815 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **21,1 KN/mm<sup>2</sup>**

A.40.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 20 F

**Probe: M 1:3 20 A**

Länge: 160,01 mm  
Breite: 39,92 mm  
Tiefe: 39,84 mm  
Fläche: 1590,41 mm<sup>2</sup>  
Masse: 437,20 g  
Volumen: 254,48 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,718 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ $\mu$ s ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	57,5	2783	12,0
2	57,5	2783	12,0
3	57,2	2797	12,1
4	57,4	2788	12,0
<b>Mittelwerte</b>	<b>57,4</b>	<b>2788</b>	<b>12,0</b>

**Probe: M 1:3 20 B**

Länge: 159,74 mm  
Breite: 39,27 mm  
Tiefe: 39,87 mm  
Fläche: 1565,69 mm<sup>2</sup>  
Masse: 439,20 g  
Volumen: 250,10 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,756 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ $\mu$ s ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	57,5	2778	12,2
2	57,4	2783	12,2
3	57,5	2778	12,2
4	57,3	2788	12,3
<b>Mittelwerte</b>	<b>57,4</b>	<b>2782</b>	<b>12,2</b>

**Probe: M 1:3 20 C**

Länge: 159,70 mm  
Breite: 39,00 mm  
Tiefe: 39,77 mm  
Fläche: 1551,03 mm<sup>2</sup>  
Masse: 439,20 g  
Volumen: 247,70 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,773 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ $\mu$ s ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	57,7	2768	12,2
2	57,9	2758	12,1
3	57,2	2792	12,4
4	57,5	2777	12,3
<b>Mittelwerte</b>	<b>57,6</b>	<b>2774</b>	<b>12,3</b>

Mischung 1:3 20 : Dichte: **1,749 g/cm<sup>3</sup>**

**Dynamischer E-Modul: 12,2 KN/mm<sup>2</sup>**

A.41.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 20

**Probe: M 1:4 20 F A**

Länge: 159,47 mm  
Breite: 40,33 mm  
Tiefe: 37,87 mm  
Fläche: 1527,30 mm<sup>2</sup>  
Masse: 532,20 g  
Volumen: 243,56 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,185 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu$ s ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	42,2	3779	28,1
2	42,3	3770	28,0
3	42,4	3761	27,8
4	42,4	3761	27,8
<b>Mittelwerte</b>	<b>42,3</b>	<b>3768</b>	<b>27,9</b>

**Probe: M 1:4 20 F B**

Länge: 159,66 mm  
Breite: 40,65 mm  
Tiefe: 40,18 mm  
Fläche: 1633,32 mm<sup>2</sup>  
Masse: 534,90 g  
Volumen: 260,78 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,051 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu$ s ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	43,0	3713	25,5
2	42,8	3730	25,7
3	43,1	3704	25,3
4	42,7	3739	25,8
<b>Mittelwerte</b>	<b>42,9</b>	<b>3722</b>	<b>25,6</b>

**Probe: M 1:4 20 F C**

Länge: 159,68 mm  
Breite: 40,50 mm  
Tiefe: 39,79 mm  
Fläche: 1611,50 mm<sup>2</sup>  
Masse: 527,00 g  
Volumen: 257,32 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,048 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ $\mu$ s ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	43,4	3679	25,0
2	43,3	3688	25,1
3	43,4	3679	25,0
4	43,2	3696	25,2
<b>Mittelwerte</b>	<b>43,3</b>	<b>3686</b>	<b>25,0</b>

**Mischung 1:4 20 F : Dichte: 2,095 g/cm<sup>3</sup>**

**Dynamischer E-Modul: 26,2 KN/mm<sup>2</sup>**

A.42.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 20 F

**Probe: M 1:4 20 FLP A**

Länge: 159,74 mm  
Breite: 41,09 mm  
Tiefe: 39,86 mm  
Fläche: 1637,85 mm<sup>2</sup>  
Masse: 453,20 g  
Volumen: 261,63 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,732 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	48,6	3287	16,8
2	48,8	3273	16,7
3	48,8	3273	16,7
4	48,6	3287	16,8
<b>Mittelwerte</b>	<b>48,7</b>	<b>3280</b>	<b>16,8</b>

**Probe: M 1:4 20 FLP B**

Länge: 159,90 mm  
Breite: 40,53 mm  
Tiefe: 39,95 mm  
Fläche: 1619,17 mm<sup>2</sup>  
Masse: 453,10 g  
Volumen: 258,91 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,750 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	48,8	3277	16,9
2	48,4	3304	17,2
3	48,8	3277	16,9
4	48,4	3304	17,2
<b>Mittelwerte</b>	<b>48,6</b>	<b>3290</b>	<b>17,1</b>

**Probe: M 1:4 20 FLP C**

Länge: 159,49 mm  
Breite: 40,48 mm  
Tiefe: 40,05 mm  
Fläche: 1621,22 mm<sup>2</sup>  
Masse: 447,70 g  
Volumen: 258,57 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,731 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	48,4	3295	16,9
2	48,8	3268	16,6
3	48,8	3268	16,6
4	48,9	3262	16,6
<b>Mittelwerte</b>	<b>48,7</b>	<b>3273</b>	<b>16,7</b>

Mischung 1:4 20 FLP: Dichte: **1,738 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **16,8 KN/mm<sup>2</sup>**

A.43.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 20 FLP

**Probe: M 1:4 20 A**

Länge: 160,36 mm  
Breite: 40,49 mm  
Tiefe: 39,79 mm  
Fläche: 1611,10 mm<sup>2</sup>  
Masse: 459,60 g  
Volumen: 258,36 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,779 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	58,8	2727	11,9
2	59,1	2713	11,8
3	59,3	2704	11,7
4	59,3	2704	11,7
<b>Mittelwerte</b>	59,1	<b>2712</b>	<b>11,8</b>

**Probe: M 1:4 20 B**

Länge: 160,49 mm  
Breite: 40,81 mm  
Tiefe: 39,90 mm  
Fläche: 1628,32 mm<sup>2</sup>  
Masse: 468,20 g  
Volumen: 261,33 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,792 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	58,8	2729	12,0
2	58,8	2729	12,0
3	59,0	2720	11,9
4	58,6	2739	12,1
<b>Mittelwerte</b>	58,8	<b>2729</b>	<b>12,0</b>

**Probe: M 1:4 20 C**

Länge: 160,80 mm  
Breite: 40,30 mm  
Tiefe: 40,06 mm  
Fläche: 1614,42 mm<sup>2</sup>  
Masse: 460,80 g  
Volumen: 259,60 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,775 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	59,2	2716	11,8
2	59,3	2712	11,7
3	59,2	2716	11,8
4	59,9	2684	11,5
<b>Mittelwerte</b>	59,4	<b>2707</b>	<b>11,7</b>

**Mischung 1:4 20 : Dichte: 1,782 g/cm<sup>3</sup>**

**Dynamischer E-Modul: 11,8 KN/mm<sup>2</sup>**

A.44.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 20

**Probe: M 1:2 30 F A**

Länge: 159,75 mm  
Breite: 38,85 mm  
Tiefe: 39,70 mm  
Fläche: 1542,35 mm<sup>2</sup>  
Masse: 507,40 g  
Volumen: 246,39 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,059 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	40,8	3915	28,4
2	41,8	3822	27,1
3	41,2	3877	27,9
4	39,6	4034	30,2
<b>Mittelwerte</b>	40,9	<b>3912</b>	<b>28,4</b>

**Probe: M 1:2 30 F B**

Länge: 160,00 mm  
Breite: 39,04 mm  
Tiefe: 39,80 mm  
Fläche: 1553,79 mm<sup>2</sup>  
Masse: 515,30 g  
Volumen: 248,61 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,073 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	40,7	3931	28,8
2	40,6	3941	29,0
3	41,1	3893	28,3
4	41,1	3893	28,3
<b>Mittelwerte</b>	40,9	<b>3914</b>	<b>28,6</b>

**Probe: M 1:2 30 F C**

Länge: 159,84 mm  
Breite: 39,13 mm  
Tiefe: 39,90 mm  
Fläche: 1561,29 mm<sup>2</sup>  
Masse: 508,00 g  
Volumen: 249,56 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,036 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	40,8	3918	28,1
2	41,1	3889	27,7
3	40,6	3937	28,4
4	40,7	3927	28,3
<b>Mittelwerte</b>	40,8	<b>3918</b>	<b>28,1</b>

**Mischung 1:2 30 F : Dichte: 2,056 g/cm<sup>3</sup>**

**Dynamischer E-Modul: 28,4 KN/mm<sup>2</sup>**

A.45.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 30 F

**Probe: M 1:2 30 FLP A**

Länge: 160,05 mm  
Breite: 40,44 mm  
Tiefe: 39,83 mm  
Fläche: 1610,73 mm<sup>2</sup>  
Masse: 485,10 g  
Volumen: 257,80 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,882 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	43,3	3696	23,1
2	43,2	3705	23,2
3	43,2	3705	23,2
4	43,2	3705	23,2
<b>Mittelwerte</b>	43,2	<b>3703</b>	<b>23,2</b>

**Probe: M 1:2 30 FLP B**

Länge: 159,92 mm  
Breite: 40,11 mm  
Tiefe: 39,77 mm  
Fläche: 1595,17 mm<sup>2</sup>  
Masse: 486,50 g  
Volumen: 255,10 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,907 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	43,1	3710	23,6
2	43,2	3702	23,5
3	43,0	3719	23,7
4	43,0	3719	23,7
<b>Mittelwerte</b>	43,1	<b>3713</b>	<b>23,7</b>

**Probe: M 1:2 30 FLP C**

Länge: 159,76 mm  
Breite: 40,67 mm  
Tiefe: 39,85 mm  
Fläche: 1620,70 mm<sup>2</sup>  
Masse: 489,10 g  
Volumen: 258,92 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,889 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schalllaufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	43,1	3707	23,4
2	43,2	3698	23,3
3	43,2	3698	23,3
4	43,3	3690	23,1
<b>Mittelwerte</b>	43,2	<b>3698</b>	<b>23,3</b>

Mischung 1:2 30 FLP : Dichte: **1,893 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **23,4 KN/mm<sup>2</sup>**

A.46.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 30 FLP

**Probe: M 1:2 30 A**

Länge: 159,37 mm  
Breite: 40,00 mm  
Tiefe: 39,86 mm  
Fläche: 1594,40 mm<sup>2</sup>  
Masse: 435,50 g  
Volumen: 254,10 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,714 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	59,2	2692	11,2
2	59,3	2688	11,1
3	58,7	2715	11,4
4	58,8	2710	11,3
<b>Mittelwerte</b>	<b>59,0</b>	<b>2701</b>	<b>11,3</b>

**Probe: M 1:2 30 B**

Länge: 159,21 mm  
Breite: 39,88 mm  
Tiefe: 39,85 mm  
Fläche: 1589,22 mm<sup>2</sup>  
Masse: 440,10 g  
Volumen: 253,02 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,739 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	58,3	2731	11,7
2	58,7	2712	11,5
3	57,4	2774	12,0
4	57,5	2769	12,0
<b>Mittelwerte</b>	<b>58,0</b>	<b>2746</b>	<b>11,8</b>

**Probe: M 1:2 30 C**

Länge: 159,25 mm  
Breite: 40,10 mm  
Tiefe: 39,70 mm  
Fläche: 1591,97 mm<sup>2</sup>  
Masse: 431,10 g  
Volumen: 253,52 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,700 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallge-schwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	58,8	2708	11,2
2	59,0	2699	11,1
3	59,4	2681	11,0
4	58,7	2713	11,3
<b>Mittelwerte</b>	<b>59,0</b>	<b>2700</b>	<b>11,2</b>

Mischung 1:2 30 : Dichte: **1,718 g/cm<sup>3</sup>**  
Dynamischer E-Modul: **11,4 KN/mm<sup>2</sup>**

A.47.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:2 30

**Probe: M 1:3 30 F A**

Länge: 159,00 mm  
Breite: 40,89 mm  
Tiefe: 39,83 mm  
Fläche: 1628,65 mm<sup>2</sup>  
Masse: 526,60 g  
Volumen: 258,96 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,034 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	41,2	3859	27,3
2	41,3	3850	27,1
3	41,7	3813	26,6
4	41,6	3822	26,7
<b>Mittelwerte</b>	<b>41,5</b>	<b>3836</b>	<b>26,9</b>

**Probe: M 1:3 30 F B**

Länge: 159,16 mm  
Breite: 41,00 mm  
Tiefe: 39,89 mm  
Fläche: 1635,49 mm<sup>2</sup>  
Masse: 528,60 g  
Volumen: 260,30 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,031 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	41,2	3863	27,3
2	41,3	3854	27,1
3	41,4	3844	27,0
4	41,6	3826	26,8
<b>Mittelwerte</b>	<b>41,4</b>	<b>3847</b>	<b>27,0</b>

**Probe: M 1:3 30 F C**

Länge: 159,03 mm  
Breite: 41,30 mm  
Tiefe: 39,71 mm  
Fläche: 1640,02 mm<sup>2</sup>  
Masse: 526,60 g  
Volumen: 260,81 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,019 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	42,1	3777	25,9
2	42,2	3768	25,8
3	42,1	3777	25,9
4	42,6	3733	25,3
<b>Mittelwerte</b>	<b>42,3</b>	<b>3764</b>	<b>25,7</b>

**Mischung 1:3 30 F : Dichte: 2,028 g/cm<sup>3</sup>**

**Dynamischer E-Modul: 26,6 KN/mm<sup>2</sup>**

A.48.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 30 F

**Probe: M 1:3 30 FLP A**

Länge: 160,18 mm  
Breite: 40,53 mm  
Tiefe: 39,82 mm  
Fläche: 1613,90 mm<sup>2</sup>  
Masse: 474,20 g  
Volumen: 258,52 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,834 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	45,7	3505	20,3
2	45,8	3497	20,2
3	45,7	3505	20,3
4	45,8	3497	20,2
<b>Mittelwerte</b>	45,8	<b>3501</b>	<b>20,2</b>

**Probe: M 1:3 30 FLP B**

Länge: 160,05 mm  
Breite: 40,67 mm  
Tiefe: 39,87 mm  
Fläche: 1621,51 mm<sup>2</sup>  
Masse: 471,00 g  
Volumen: 259,52 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,815 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	45,7	3502	20,0
2	45,7	3502	20,0
3	45,9	3487	19,9
4	45,9	3487	19,9
<b>Mittelwerte</b>	45,8	<b>3495</b>	<b>19,9</b>

**Probe: M 1:3 30 FLP C**

Länge: 160,15 mm  
Breite: 40,75 mm  
Tiefe: 39,90 mm  
Fläche: 1625,93 mm<sup>2</sup>  
Masse: 473,50 g  
Volumen: 260,39 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,818 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	45,9	3489	19,9
2	46,6	3437	19,3
3	46,7	3429	19,2
4	46,4	3452	19,5
<b>Mittelwerte</b>	46,4	<b>3452</b>	<b>19,5</b>

Mischung 1:3 30 FLP : Dichte: **1,823 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **19,9 KN/mm<sup>2</sup>**

A.49.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 30 F

**Probe: M 1:3 30 A**

Länge: 160,13 mm  
Breite: 40,56 mm  
Tiefe: 39,88 mm  
Fläche: 1617,53 mm<sup>2</sup>  
Masse: 441,80 g  
Volumen: 259,02 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,706 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	60,7	2638	10,7
2	60,6	2642	10,7
3	60,2	2660	10,9
4	61,8	2591	10,3
<b>Mittelwerte</b>	<b>60,8</b>	<b>2633</b>	<b>10,6</b>

**Probe: M 1:3 30 B**

Länge: 160,07 mm  
Breite: 41,03 mm  
Tiefe: 39,87 mm  
Fläche: 1635,87 mm<sup>2</sup>  
Masse: 444,10 g  
Volumen: 261,85 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,696 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	62,0	2582	10,2
2	62,5	2561	10,0
3	62,4	2565	10,0
4	62,4	2565	10,0
<b>Mittelwerte</b>	<b>62,3</b>	<b>2568</b>	<b>10,1</b>

**Probe: M 1:3 30 C**

Länge: 160,07 mm  
Breite: 40,94 mm  
Tiefe: 39,86 mm  
Fläche: 1631,87 mm<sup>2</sup>  
Masse: 437,90 g  
Volumen: 261,21 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,676 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	64,0	2501	9,4
2	64,0	2501	9,4
3	65,8	2433	8,9
4	64,5	2482	9,3
<b>Mittelwerte</b>	<b>64,6</b>	<b>2479</b>	<b>9,3</b>

Mischung 1:3 30 : Dichte: **1,693 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **10,0 KN/mm<sup>2</sup>**

A.50.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:3 30 F

**Probe: M 1:4 30 F A**

Länge: 159,73 mm  
Breite: 40,39 mm  
Tiefe: 39,77 mm  
Fläche: 1606,31 mm<sup>2</sup>  
Masse: 526,80 g  
Volumen: 256,58 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,053 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	42,9	3723	25,6
2	42,4	3767	26,2
3	42,5	3758	26,1
4	42,7	3741	25,9
<b>Mittelwerte</b>	<b>42,625</b>	<b>3747</b>	<b>26,0</b>

**Probe: M 1:4 30 F B**

Länge: 159,30 mm  
Breite: 40,05 mm  
Tiefe: 39,74 mm  
Fläche: 1591,59 mm<sup>2</sup>  
Masse: 533,30 g  
Volumen: 253,54 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,103 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	42,5	3748	26,6
2	42,7	3731	26,3
3	42,8	3722	26,2
4	42	3793	27,2
<b>Mittelwerte</b>	<b>42,5</b>	<b>3748</b>	<b>26,6</b>

**Probe: M 1:4 30 F C**

Länge: 159,41 mm  
Breite: 40,07 mm  
Tiefe: 40,00 mm  
Fläche: 1602,80 mm<sup>2</sup>  
Masse: 531,20 g  
Volumen: 255,50 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **2,079 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	43,1	3699	25,6
2	43,1	3699	25,6
3	43	3707	25,7
4	42,9	3716	25,8
<b>Mittelwerte</b>	<b>43,025</b>	<b>3705</b>	<b>25,7</b>

**Mischung 1:4 30 F : Dichte: 2,079 g/cm<sup>3</sup>**

**Dynamischer E-Modul: 26,1 KN/mm<sup>2</sup>**

A.51.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 20 F

**Probe: M 1:4 30 FLP A**

Länge: 159,71 mm  
Breite: 40,92 mm  
Tiefe: 40,03 mm  
Fläche: 1638,03 mm<sup>2</sup>  
Masse: 487,30 g  
Volumen: 261,61 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,863 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	46,6	3427	19,7
2	47,0	3398	19,4
3	47,4	3369	19,0
4	47,5	3362	19,0
<b>Mittelwerte</b>	<b>47,1</b>	<b>3389</b>	<b>19,3</b>

**Probe: M 1:4 30 FLP B**

Länge: 159,52 mm  
Breite: 41,01 mm  
Tiefe: 40,02 mm  
Fläche: 1641,22 mm<sup>2</sup>  
Masse: 484,00 g  
Volumen: 261,81 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,849 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	47,1	3387	19,1
2	47,1	3387	19,1
3	47,0	3394	19,2
4	47,0	3394	19,2
<b>Mittelwerte</b>	<b>47,1</b>	<b>3390</b>	<b>19,1</b>

**Probe: M 1:4 30 FLP C**

Länge: 159,64 mm  
Breite: 40,48 mm  
Tiefe: 39,88 mm  
Fläche: 1614,34 mm<sup>2</sup>  
Masse: 480,40 g  
Volumen: 257,71 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,864 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	47,7	3347	18,8
2	48,1	3319	18,5
3	48,2	3312	18,4
4	48,2	3312	18,4
<b>Mittelwerte</b>	<b>48,1</b>	<b>3322</b>	<b>18,5</b>

Mischung 1:4 30 FLP : Dichte: **1,858 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **19,0 KN/mm<sup>2</sup>**

A.52.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 30 FLP

**Probe: M 1:4 30 A**

Länge: 160,37 mm  
Breite: 40,20 mm  
Tiefe: 39,89 mm  
Fläche: 1603,58 mm<sup>2</sup>  
Masse: 444,60 g  
Volumen: 257,17 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,729 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	64,5	2486	9,6
2	64,5	2486	9,6
3	64,7	2479	9,6
4	64,9	2471	9,5
<b>Mittelwerte</b>	<b>64,7</b>	<b>2481</b>	<b>9,6</b>

**Probe: M 1:4 30 B**

Länge: 160,55 mm  
Breite: 40,01 mm  
Tiefe: 40,16 mm  
Fläche: 1606,80 mm<sup>2</sup>  
Masse: 450,90 g  
Volumen: 257,97 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,748 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	63,9	2513	9,9
2	63,9	2513	9,9
3	64,6	2485	9,7
4	64,7	2481	9,7
<b>Mittelwerte</b>	<b>64,3</b>	<b>2498</b>	<b>9,8</b>

**Probe: M 1:4 30 C**

Länge: 160,30 mm  
Breite: 40,12 mm  
Tiefe: 39,89 mm  
Fläche: 1600,39 mm<sup>2</sup>  
Masse: 446,20 g  
Volumen: 256,54 cm<sup>3</sup>  
  
Dichte: **1,739 g/cm<sup>3</sup>**

Messungs-Nr.	Schall-laufzeit [ μs ]	Schallgeschwindigkeit [ mm/s ]	E-Modul [ KN/mm <sup>2</sup> ]
1	66,5	2411	9,1
2	67,0	2393	9,0
3	66,1	2425	9,2
4	67,4	2378	8,9
<b>Mittelwerte</b>	<b>66,8</b>	<b>2402</b>	<b>9,0</b>

Mischung 1:4 30 : Dichte: **1,739 g/cm<sup>3</sup>**

Dynamischer E-Modul: **9,5 KN/mm<sup>2</sup>**

A.53.1: Dynamischer E-Modul nach 28 Tagen M 1:4 30

		Tage nach der Herstellung												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:2 20 F	A oben	0	0,013	0,046	0,062	0,07	0,087	0,091	0,096	0,1	0,097	0,097	0,1	0,1
M 1:2 20 F	A unten	0	0,014	0,042	0,058	0,07	0,086	0,092	0,098	0,099	0,099	0,098	0,1	0,101
Mittelwerte[%]	A	0	0,0135	0,044	0,06	0,07	0,0865	0,0915	0,097	0,0995	0,098	0,0975	0,1	0,1005
M 1:2 20 F	B oben	0	0,018	0,048	0,064	0,078	0,091	0,093	0,103	0,102	0,101	0,103	0,105	0,105
M 1:2 20 F	B unten	0	0,013	0,046	0,06	0,076	0,09	0,094	0,103	0,104	0,1	0,102	0,102	0,104
Mittelwerte [%]	B	0	0,0155	0,047	0,062	0,077	0,0905	0,0935	0,103	0,103	0,1005	0,1025	0,1035	0,1045
M 1:2 20 F	C oben	0	0,019	0,047	0,065	0,075	0,091	0,094	0,103	0,099	0,104	0,102	0,103	0,103
M 1:2 20 F	C unten	0	0,01	0,046	0,065	0,074	0,092	0,096	0,105	0,102	0,101	0,103	0,107	0,108
Mittelwerte [%]	C	0	0,0145	0,0465	0,065	0,0745	0,0915	0,095	0,104	0,1005	0,1025	0,1025	0,105	0,1055
<b>Mittelwerte</b>														
<b>M 1:2 20 F</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,145</b>	<b>0,45833</b>	<b>0,62333</b>	<b>0,73833</b>	<b>0,895</b>	<b>0,93333</b>	<b>1,01333</b>	<b>1,01</b>	<b>1,00333</b>	<b>1,00833</b>	<b>1,02833</b>	<b>1,035</b>

A. 54.1: Schwindmaße M 1:2 20 F

		Tage nach der Herstellung												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:2 20 FLP	A oben	0	0,022	0,054	0,075	0,089	0,107	0,112	0,123	0,115	0,121	0,124	0,128	0,13
M 1:2 20 FLP	A unten	0	0,014	0,043	0,071	0,084	0,105	0,111	0,121	0,111	0,12	0,122	0,126	0,127
Mittelwerte	A	0	0,018	0,0485	0,073	0,0865	0,106	0,1115	0,122	0,113	0,1205	0,123	0,127	0,1285
M 1:2 20 FLP	B oben	0	0,03	0,056	0,077	0,09	0,109	0,117	0,125	0,115	0,124	0,128	0,132	0,133
M 1:2 20 FLP	B unten	0	0,016	0,048	0,072	0,09	0,104	0,113	0,121	0,122	0,12	0,124	0,127	0,129
Mittelwerte	B	0	0,023	0,052	0,0745	0,09	0,1065	0,115	0,123	0,1185	0,122	0,126	0,1295	0,131
M 1:2 20 FLP	C oben	0	0,026	0,057	0,079	0,09	0,107	0,115	0,124	0,124	0,123	0,126	0,13	0,132
M 1:2 20 FLP	C unten	0	0,018	0,052	0,076	0,09	0,108	0,115	0,123	0,124	0,121	0,125	0,129	0,13
Mittelwerte	C	0	0,022	0,0545	0,0775	0,09	0,1075	0,115	0,1235	0,124	0,122	0,1255	0,1295	0,131
<b>Mittelwerte</b>														
<b>M 1:2 20 FLP</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,21</b>	<b>0,51667</b>	<b>0,75</b>	<b>0,88833</b>	<b>1,06667</b>	<b>1,13833</b>	<b>1,22833</b>	<b>1,185</b>	<b>1,215</b>	<b>1,24833</b>	<b>1,28667</b>	<b>1,30167</b>

A. 54.2: Schwindmaße M 1:2 20 FLP

			Tage nach der Herstellung												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:2 20	A	oben	0	0,009	0,025	0,051	0,069	0,101	0,116	0,131	0,136	0,14	0,152	0,158	0,162
M 1:2 20	A	unten	0	0,007	0,024	0,055	0,071	0,104	0,12	0,134	0,14	0,145	0,155	0,161	0,168
Mittelwerte	A		0	0,008	0,0245	0,053	0,07	0,1025	0,118	0,1325	0,138	0,1425	0,1535	0,1595	0,165
M 1:2 20	B	oben	0	0,004	0,027	0,053	0,069	0,103	0,116	0,132	0,137	0,141	0,153	0,156	0,162
M 1:2 20	B	unten	0	0,003	0,021	0,052	0,063	0,1	0,112	0,126	0,132	0,133	0,143	0,15	0,152
Mittelwerte	B		0	0,0035	0,024	0,0525	0,066	0,1015	0,114	0,129	0,1345	0,137	0,148	0,153	0,157
M 1:2 20	C	oben	0	0,003	0,028	0,057	0,066	0,105	0,119	0,135	0,139	0,143	0,153	0,156	0,16
M 1:2 20	C	unten	0	0,001	0,029	0,06	0,072	0,108	0,123	0,137	0,141	0,145	0,154	0,157	0,16
Mittelwerte															
<b>M 1:2 20</b>	<b>in [‰]</b>		<b>0</b>	<b>0,04167</b>	<b>0,25833</b>	<b>0,55167</b>	<b>0,69333</b>	<b>1,04</b>	<b>1,18333</b>	<b>1,32833</b>	<b>1,37833</b>	<b>1,415</b>	<b>1,51833</b>	<b>1,565</b>	<b>1,60667</b>

A. 55.1: Schwindmaße M 1:2 20

			Tage nach der Herstellung												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:3 20 F	A	oben	0	0,019	0,041	0,064	0,069	0,085	0,091	0,099	0,095	0,092	0,096	0,096	0,096
M 1:3 20 F	A	unten	0	0,01	0,028	0,055	0,061	0,079	0,085	0,095	0,09	0,087	0,092	0,091	0,091
Mittelwerte	A		0	0,0145	0,0345	0,0595	0,065	0,082	0,088	0,097	0,0925	0,0895	0,094	0,0935	0,0935
M 1:3 20 F	B	oben	0	0,017	0,042	0,065	0,07	0,089	0,093	0,103	0,096	0,095	0,1	0,098	0,1
M 1:3 20 F	B	unten	0	0,006	0,033	0,058	0,06	0,082	0,084	0,095	0,09	0,088	0,093	0,092	0,094
Mittelwerte	B		0	0,0115	0,0375	0,0615	0,065	0,0855	0,0885	0,099	0,093	0,0915	0,0965	0,095	0,097
M 1:3 20 F	C	oben	0	0,016	0,038	0,064	0,067	0,086	0,088	0,1	0,096	0,091	0,096	0,095	0,096
M 1:3 20 F	C	unten	0	0,008	0,035	0,062	0,064	0,085	0,084	0,097	0,093	0,092	0,097	0,095	0,096
Mittelwerte	C		0	0,012	0,0365	0,063	0,0655	0,0855	0,086	0,0985	0,0945	0,0915	0,0965	0,095	0,096
Mittelwerte															
<b>M 1:3 20 F</b>	<b>in [‰]</b>		<b>0</b>	<b>0,12667</b>	<b>0,36167</b>	<b>0,61333</b>	<b>0,65167</b>	<b>0,84333</b>	<b>0,875</b>	<b>0,98167</b>	<b>0,93333</b>	<b>0,90833</b>	<b>0,95667</b>	<b>0,945</b>	<b>0,955</b>

A. 55.2: Schwindmaße M 1:3 20 F

			Tage nach der Herstellung												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:3 20 FLP	A	oben	0	0,016	0,039	0,065	0,068	0,09	0,088	0,101	0,097	0,096	0,1	0,098	0,1
M 1:3 20 FLP	A	unten	0	0,01	0,035	0,061	0,064	0,085	0,088	0,1	0,097	0,094	0,098	0,095	0,098
Mittelwerte	A		0	0,013	0,037	0,063	0,066	0,0875	0,088	0,1005	0,097	0,095	0,099	0,0965	0,099
M 1:3 20 FLP	B	oben	0	0,009	0,039	0,063	0,067	0,089	0,091	0,104	0,1	0,099	0,104	0,1	0,105
M 1:3 20 FLP	B	unten	0	0,007	0,035	0,06	0,065	0,088	0,091	0,104	0,102	0,095	0,104	0,1	0,105
Mittelwerte	B		0	0,008	0,037	0,0615	0,066	0,0885	0,091	0,104	0,101	0,097	0,104	0,1	0,105
M 1:3 20 FLP	C	oben	0	0,012	0,041	0,063	0,068	0,088	0,09	0,104	0,102	0,095	0,102	0,1	0,103
M 1:3 20 FLP	C	unten	0	0,008	0,04	0,059	0,062	0,09	0,092	0,104	0,104	0,094	0,103	0,103	0,103
Mittelwerte	C		0	0,01	0,0405	0,061	0,065	0,089	0,091	0,104	0,103	0,0945	0,1025	0,1015	0,103
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:3 20 FLP</b>	<b>in [‰]</b>		<b>0</b>	<b>0,10333</b>	<b>0,38167</b>	<b>0,61833</b>	<b>0,65667</b>	<b>0,88333</b>	<b>0,9</b>	<b>1,02833</b>	<b>1,00333</b>	<b>0,955</b>	<b>1,01833</b>	<b>0,99333</b>	<b>1,02333</b>

A. 56.1: Schwindmaße M 1:3 20 FLP

			Tage nach der Herstellung												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:3 20	A	oben	0	0,002	0,018	0,041	0,06	0,093	0,102	0,122					
M 1:3 20	A	unten	0	0,003	0,021	0,02	0,057	0,087	0,097	0,117	0,117	0,115	0,133	0,134	0,136
Mittelwerte	A		0	0,0025	0,0195	0,0305	0,0585	0,09	0,0995	0,1195	0,117	0,115	0,133	0,134	0,136
M 1:3 20	B	oben	0	0,49	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M 1:3 20	B	unten	0	0,511	0,532	0,534	0,568	0,595	0,607	-	-	-	-	-	-
M 1:3 20	C	oben	0	0,004	0,03	0,037	0,068	0,094	0,103	0,121	0,124	0,117	0,134	0,135	0,137
M 1:3 20	C	unten	0	0,004	0,029	0,042	0,071	0,096	0,106	0,124	0,128	0,123	0,141	0,14	0,143
Mittelwerte	C		0	0,004	0,0295	0,0395	0,0695	0,095	0,1045	0,1225	0,126	0,12	0,1375	0,1375	0,14
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:3 20</b>	<b>in [‰]</b>		<b>0</b>	<b>0,0325</b>	<b>0,245</b>	<b>0,35</b>	<b>0,64</b>	<b>0,925</b>	<b>1,02</b>	<b>1,21</b>	<b>1,215</b>	<b>1,175</b>	<b>1,3525</b>	<b>1,3575</b>	<b>1,38</b>

A. 56.2: Schwindmaße M 1:3 20

			Tage nach der Herstellung												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:4 20 F	A	oben	0	0,018	0,042	0,045	0,067	0,076	0,082	0,095	0,092	0,08	0,095	0,094	0,097
M 1:4 20 F	A	unten	0	0,011	0,031	0,04	0,061	0,071	0,075	0,087	0,087	0,08	0,089	0,09	0,091
Mittelwerte	A		0	0,0145	0,0365	0,0425	0,064	0,0735	0,0785	0,091	0,0895	0,08	0,092	0,092	0,094
M 1:4 20 F	B	oben	0	0,015	0,033	0,039	0,059	0,069	0,075	0,084	0,085	0,075	0,084	0,08	0,082
M 1:4 20 F	B	unten	0	0,006	0,024	0,031	0,053	0,061	0,071	0,078	0,082	0,073	0,085	0,081	0,077
Mittelwerte	B		0	0,0105	0,0285	0,035	0,056	0,065	0,073	0,081	0,0835	0,074	0,0845	0,0805	0,0795
M 1:4 20 F	C	oben	0	0,014	0,034	0,043	0,058	0,072	0,075	0,081	0,084	0,077	0,086	0,084	0,085
M 1:4 20 F	C	unten	0	0,008	0,03	0,04	0,057	0,068	0,076	0,082	0,086	0,076	0,088	0,084	0,083
Mittelwerte	C		0	0,011	0,032	0,0415	0,0575	0,07	0,0755	0,0815	0,085	0,0765	0,087	0,084	0,084
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:4 20 F</b>	<b>in [‰]</b>		<b>0</b>	<b>0,12</b>	<b>0,32333</b>	<b>0,39667</b>	<b>0,59167</b>	<b>0,695</b>	<b>0,75667</b>	<b>0,845</b>	<b>0,86</b>	<b>0,76833</b>	<b>0,87833</b>	<b>0,855</b>	<b>0,85833</b>

A. 57.1: Schwindmaße M 1:4 20 F

			Tage nach der Herstellung												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:4 20 FLP	A	oben	0	0,016	0,038	0,048	0,064	0,077	0,083	0,088	0,09	0,087	0,092	0,093	0,09
M 1:4 20 FLP	A	unten	0	0,007	0,031	0,042	0,06	0,075	0,08	0,087	0,089	0,085	0,093	0,095	0,085
Mittelwerte	A		0	0,0115	0,0345	0,045	0,062	0,076	0,0815	0,0875	0,0895	0,086	0,0925	0,094	0,0875
M 1:4 20 FLP	B	oben	0	0,017	0,039	0,057	0,065	0,079	0,087	0,093	0,096	0,089	0,096	0,099	0,091
M 1:4 20 FLP	B	unten	0	0,009	0,038	0,05	0,066	0,08	0,084	0,089	0,095	0,085	0,096	0,098	0,094
Mittelwerte	B		0	0,013	0,0385	0,0535	0,0655	0,0795	0,0855	0,091	0,0955	0,087	0,096	0,0985	0,0925
M 1:4 20 FLP	C	oben	0	0,017	0,04	0,052	0,065	0,081	0,085	0,092	0,096	0,09	0,099	0,102	0,097
M 1:4 20 FLP	C	unten	0	0,009	0,034	0,052	0,066	0,082	0,086	0,093	0,098	0,092	0,099	0,103	0,098
Mittelwerte	C		0	0,013	0,037	0,052	0,0655	0,0815	0,0855	0,0925	0,097	0,091	0,099	0,1025	0,0975
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:4 20 FLP</b>	<b>in [‰]</b>		<b>0</b>	<b>0,125</b>	<b>0,36667</b>	<b>0,50167</b>	<b>0,64333</b>	<b>0,79</b>	<b>0,84167</b>	<b>0,90333</b>	<b>0,94</b>	<b>0,88</b>	<b>0,95833</b>	<b>0,98333</b>	<b>0,925</b>

A. 57.2: Schwindmaße M 1:4 20 FLP

			Tage nach der Herstellung												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:4 20	A	oben	0	0,012	0,033	0,038	0,057	0,087	0,094	0,103	0,113	0,11	0,121	0,125	0,121
M 1:4 20	A	unten	0	0,013	0,017	0,032	0,052	0,079	0,085	0,094	0,103	0,1	0,112	0,115	0,11
Mittelwerte	A		0	0,0125	0,025	0,035	0,0545	0,083	0,0895	0,0985	0,108	0,105	0,1165	0,12	0,1155
M 1:4 20	B	oben	0	0,016	0,016	0,035	0,055	0,08	0,09	0,1	0,11	0,108	0,12	0,122	0,118
M 1:4 20	B	unten	0	0,009	0,017	0,035	0,054	0,078	0,088	0,097	0,103	0,103	0,114	0,116	0,111
Mittelwerte	B		0	0,0125	0,0165	0,035	0,0545	0,079	0,089	0,0985	0,1065	0,1055	0,117	0,119	0,1145
M 1:4 20	C	oben	0	0,011	0,016	0,035	0,054	0,089	0,095	0,106	0,117	0,113	0,124	0,124	0,12
M 1:4 20	C	unten	0	0,015	0,018	0,036	0,051	0,077	0,087	0,098	0,106	0,104	0,109	0,111	0,108
Mittelwerte	C		0	0,013	0,017	0,0355	0,0525	0,083	0,091	0,102	0,1115	0,1085	0,1165	0,1175	0,114
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:4 20</b>	<b>in [‰]</b>		<b>0</b>	<b>0,12667</b>	<b>0,195</b>	<b>0,35167</b>	<b>0,53833</b>	<b>0,81667</b>	<b>0,89833</b>	<b>0,99667</b>	<b>1,08667</b>	<b>1,06333</b>	<b>1,16667</b>	<b>1,18833</b>	<b>1,14667</b>

A. 58.1: Schwindmaße M 1:4 20

			Tage nach der Herstellung												
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:2 30 F	A	oben	0	0,027	0,053	0,074	0,088	0,104	0,115	0,12	0,119	0,117	0,12	0,123	0,124
M 1:2 30 F	A	unten	0	0,006	0,04	0,062	0,078	0,094	0,104	0,109	0,107	0,109	0,111	0,114	0,115
Mittelwerte			0	0,0165	0,0465	0,068	0,083	0,099	0,1095	0,1145	0,113	0,113	0,1155	0,1185	0,1195
M 1:2 30 F	B	oben	0	0,014	0,047	0,068	0,083	0,102	0,11	0,113	0,112	0,115	0,115	0,118	0,119
M 1:2 30 F	B	unten	0	0,005	0,044	0,065	0,081	0,099	0,109	0,111	0,111	0,111	0,113	0,116	0,117
Mittelwerte			0	0,0095	0,0455	0,0665	0,082	0,1005	0,1095	0,112	0,1115	0,113	0,114	0,117	0,118
M 1:2 30 F	C	oben	0	0,013	0,047	0,066	0,083	0,095	0,107	0,109	0,107	0,108	0,109	0,112	0,112
M 1:2 30 F	C	unten	0	0,005	0,036	0,063	0,083	0,095	0,104	0,106	0,106	0,107	0,109	0,113	0,114
Mittelwerte	C		0	0,009	0,0415	0,0645	0,083	0,095	0,1055	0,1075	0,1065	0,1075	0,109	0,1125	0,113
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:2 30 F</b>	<b>in [‰]</b>		<b>0</b>	<b>0,11667</b>	<b>0,445</b>	<b>0,66333</b>	<b>0,82667</b>	<b>0,98167</b>	<b>1,08167</b>	<b>1,11333</b>	<b>1,10333</b>	<b>1,11167</b>	<b>1,12833</b>	<b>1,16</b>	<b>1,16833</b>

A. 58.2: Schwindmaße M 1:2 30 F

		Tage nach der Herstellung												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:2 30 FLP	A oben	0	0,016	0,041	0,069	0,09	0,106	0,116	0,116	0,117	0,12	0,123	0,126	0,127
M 1:2 30 FLP	A unten	0	0,006	0,036	0,066	0,088	0,103	0,115	0,115	0,116	0,118	0,122	0,124	0,126
Mittelwerte	A	0	0,011	0,0385	0,0675	0,089	0,1045	0,1155	0,1155	0,1165	0,119	0,1225	0,125	0,1265
M 1:2 30 FLP	B oben	0	0,014	0,043	0,069	0,092	0,105	0,115	0,116	0,12	0,122	0,125	0,128	0,13
M 1:2 30 FLP	B unten	0	0,006	0,033	0,061	0,088	0,099	0,111	0,11	0,116	0,117	0,121	0,123	0,124
Mittelwerte	B	0	0,01	0,038	0,065	0,09	0,102	0,113	0,113	0,118	0,1195	0,123	0,1255	0,127
M 1:2 30 FLP	C oben	0	0,024	0,054	0,078	0,101	0,107	0,12	0,119	0,123	0,125	0,128	0,131	0,13
M 1:2 30 FLP	C unten	0	0,012	0,051	0,074	0,097	0,104	0,119	0,118	0,122	0,122	0,126	0,129	0,132
Mittelwerte	C	0	0,018	0,0525	0,076	0,099	0,1055	0,1195	0,1185	0,1225	0,1235	0,127	0,13	0,131
<b>Mittelwerte</b>														
<b>M 1:2 30 FLP</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,13</b>	<b>0,43</b>	<b>0,695</b>	<b>0,92667</b>	<b>1,04</b>	<b>1,16</b>	<b>1,15667</b>	<b>1,19</b>	<b>1,20667</b>	<b>1,24167</b>	<b>1,26833</b>	<b>1,28167</b>

A. 59.1: Schwindmaße M 1:2 30 FLP

		Tage nach der Herstellung												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:2 30	A oben	0	0,003	0,023	0,049	0,082	0,106	0,13	0,138	0,15	0,16	0,173	0,179	0,182
M 1:2 30	A unten	0	0	0,016	0,042	0,077	0,106	0,131	0,14	0,152	0,164	0,177	0,183	0,187
Mittelwerte	A	0	0,0015	0,0195	0,0455	0,0795	0,106	0,1305	0,139	0,151	0,162	0,175	0,181	0,1845
M 1:2 30	B oben	0	0,063	0,077	0,108	0,11	0,135	0,157	0,166	0,178	0,188	0,195	0,207	0,208
M 1:2 30	B unten	0	0,01	0,021	0,047	0,08	0,108	0,13	0,143	0,153	0,164	0,177	0,185	0,188
Mittelwerte	B	0	0,0365	0,049	0,0775	0,095	0,1215	0,1435	0,1545	0,1655	0,176	0,186	0,196	0,198
M 1:2 30	C oben	0	0,007	0,033	0,063	0,094	0,116	0,14	0,151	0,157	0,166	0,177	0,182	0,187
M 1:2 30	C unten	0	0,004	0,032	0,059	0,09	0,119	0,138	0,152	0,154	0,165	0,174	0,18	0,184
Mittelwerte	C	0	0,0055	0,0325	0,061	0,092	0,1175	0,139	0,1515	0,1555	0,1655	0,1755	0,181	0,1855
<b>Mittelwerte</b>														
<b>M 1:2 30</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,145</b>	<b>0,33667</b>	<b>0,61333</b>	<b>0,88833</b>	<b>1,15</b>	<b>1,37667</b>	<b>1,48333</b>	<b>1,57333</b>	<b>1,67833</b>	<b>1,78833</b>	<b>1,86</b>	<b>1,89333</b>

A. 59.2: Schwindmaße M 1:2 30

		Tage nach der Herstellung													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18	
M 1:3 30 F	A oben	0	0,011	0,044	0,056	0,076	0,083	0,091	0,096	0,094	0,094	0,096	0,098	0,099	
M 1:3 30 F	A unten	0	0,001	0,038	0,055	0,073	0,087	0,092	0,099	0,095	0,095	0,099	0,101	0,104	
Mittelwerte	A	0	0,006	0,041	0,0555	0,0745	0,085	0,0915	0,0975	0,0945	0,0945	0,0975	0,0995	0,1015	
M 1:3 30 F	B oben	0	0,006	0,037	0,055	0,075	0,087	0,09	0,102	0,096	0,097	0,099	0,101	0,104	
M 1:3 30 F	B unten	0	0,001	0,035	0,053	0,075	0,088	0,091	0,102	0,097	0,097	0,099	0,101	0,104	
Mittelwerte	B	0	0,0035	0,036	0,054	0,075	0,0875	0,0905	0,102	0,0965	0,097	0,099	0,101	0,104	
M 1:3 30 F	C oben	0	0,006	0,038	0,066	0,074	0,087	0,098	0,099	0,093	0,093	0,096	0,098	0,099	
M 1:3 30 F	C unten	0	0,004	0,04	0,06	0,08	0,092	0,096	0,107	0,102	0,102	0,106	0,107	0,11	
Mittelwerte	C	0	0,005	0,039	0,063	0,077	0,0895	0,097	0,103	0,0975	0,0975	0,101	0,1025	0,1045	
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:3 30 F</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,04833</b>	<b>0,38667</b>	<b>0,575</b>	<b>0,755</b>	<b>0,87333</b>	<b>0,93</b>	<b>1,00833</b>	<b>0,96167</b>	<b>0,96333</b>	<b>0,99167</b>	<b>1,01</b>	<b>1,03333</b>	

A. 60.1: Schwindmaße M 1:3 30 F

		Tage nach der Herstellung													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18	
M 1:3 30 FLP	A oben	0	0,016	0,051	0,067	0,085	0,097	0,098	0,11	0,105	0,106	0,11	0,111	0,112	
M 1:3 30 FLP	A unten	0	0,006	0,04	0,061	0,08	0,093	0,096	0,109	0,105	0,105	0,11	0,111	0,113	
Mittelwerte	A	0	0,011	0,0455	0,064	0,0825	0,095	0,097	0,1095	0,105	0,1055	0,11	0,111	0,1125	
M 1:3 30 FLP	B oben	0	0,021	0,051	0,068	0,082	0,099	0,099	0,111	0,106	0,107	0,11	0,112	0,113	
M 1:3 30 FLP	B unten	0	0,025	0,057	0,075	0,096	0,108	0,11	0,123	0,118	0,119	0,123	0,124	0,126	
Mittelwerte	B	0	0,023	0,054	0,0715	0,089	0,1035	0,1045	0,117	0,112	0,113	0,1165	0,118	0,1195	
M 1:3 30 FLP	C oben	0	0,021	0,05	0,066	0,083	0,095	0,095	0,11	0,105	0,106	0,109	0,111	0,112	
M 1:3 30 FLP	C unten	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
Mittelwerte	C	0	0,021	0,05	0,066	0,083	0,095	0,095	0,11	0,105	0,106	0,109	0,111	0,112	
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:3 30 FLP</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,18333</b>	<b>0,49833</b>	<b>0,67167</b>	<b>0,84833</b>	<b>0,97833</b>	<b>0,98833</b>	<b>1,12167</b>	<b>1,07333</b>	<b>1,08167</b>	<b>1,11833</b>	<b>1,13333</b>	<b>1,14667</b>	

A. 60.2: Schwindmaße M 1:3 30 FLP

		Tage nach der Herstellung													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18	
M 1:3 30	A oben	0	0,01	0,033	0,048	0,07	0,103	0,111	0,127	0,132	0,139	0,15	0,153	0,157	
M 1:3 30	A unten	0	0,007	0,014	0,035	0,064	0,095	0,105	0,125	0,129	0,14	0,151	0,155	0,157	
Mittelwerte	A	0	0,0085	0,0235	0,0415	0,067	0,099	0,108	0,126	0,1305	0,1395	0,1505	0,154	0,157	
M 1:3 30	B oben	0	0,008	0,024	0,047	0,075	0,102	0,117	0,132	0,14	0,144	0,157	0,159	0,161	
M 1:3 30	B unten	0	0,006	0,017	0,04	0,07	0,097	0,113	0,129	0,136	0,14	0,152	0,155	0,159	
Mittelwerte	B	0	0,007	0,0205	0,0435	0,0725	0,0995	0,115	0,1305	0,138	0,142	0,1545	0,157	0,16	
M 1:3 30	C oben	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
M 1:3 30	C unten	0	0,013	0,035	0,061	0,094	0,115	0,132	0,143	0,155	0,156	0,165	0,168	0,17	
Mittelwerte	C	0	0,013	0,035	0,061	0,094	0,115	0,132	0,143	0,155	0,156	0,165	0,168	0,17	
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:3 30</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,095</b>	<b>0,26333</b>	<b>0,48667</b>	<b>0,77833</b>	<b>1,045</b>	<b>1,18333</b>	<b>1,33167</b>	<b>1,41167</b>	<b>1,45833</b>	<b>1,56667</b>	<b>1,59667</b>	<b>1,62333</b>	

A. 61.1: Schwindmaße M 1:3 30

		Tage nach der Herstellung													
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18	
M 1:4 30 F	A oben	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
M 1:4 30 F	A unten	0	0,014	0,0325	0,047	0,065	0,073	0,08	0,089	0,087	0,082	0,086	0,088	0,09	
Mittelwerte	A	0	0,014	0,0325	0,047	0,065	0,073	0,08	0,089	0,087	0,082	0,086	0,088	0,09	
M 1:4 30 F	B oben	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
M 1:4 30 F	B unten	0	0,017	0,0275	0,046	0,066	0,075	0,082	0,09	0,092	0,087	0,092	0,093	0,095	
Mittelwerte	B	0	0,017	0,0275	0,046	0,066	0,075	0,082	0,09	0,092	0,087	0,092	0,093	0,095	
M 1:4 30 F	C oben	0	0,011	0,032	0,052	0,07	0,077	0,083	0,094	0,091	0,087	0,091	0,093	0,093	
M 1:4 30 F	C unten	0	0,004	0,027	0,048	0,067	0,079	0,083	0,09	0,09	0,086	0,091	0,093	0,094	
Mittelwerte	C	0	0,0075	0,0295	0,05	0,0685	0,078	0,083	0,092	0,0905	0,0865	0,091	0,093	0,0935	
<b>Mittelwerte</b>															
<b>M 1:4 30 F</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,12833</b>	<b>0,29833</b>	<b>0,47667</b>	<b>0,665</b>	<b>0,75333</b>	<b>0,81667</b>	<b>0,90333</b>	<b>0,89833</b>	<b>0,85167</b>	<b>0,89667</b>	<b>0,91333</b>	<b>0,92833</b>	

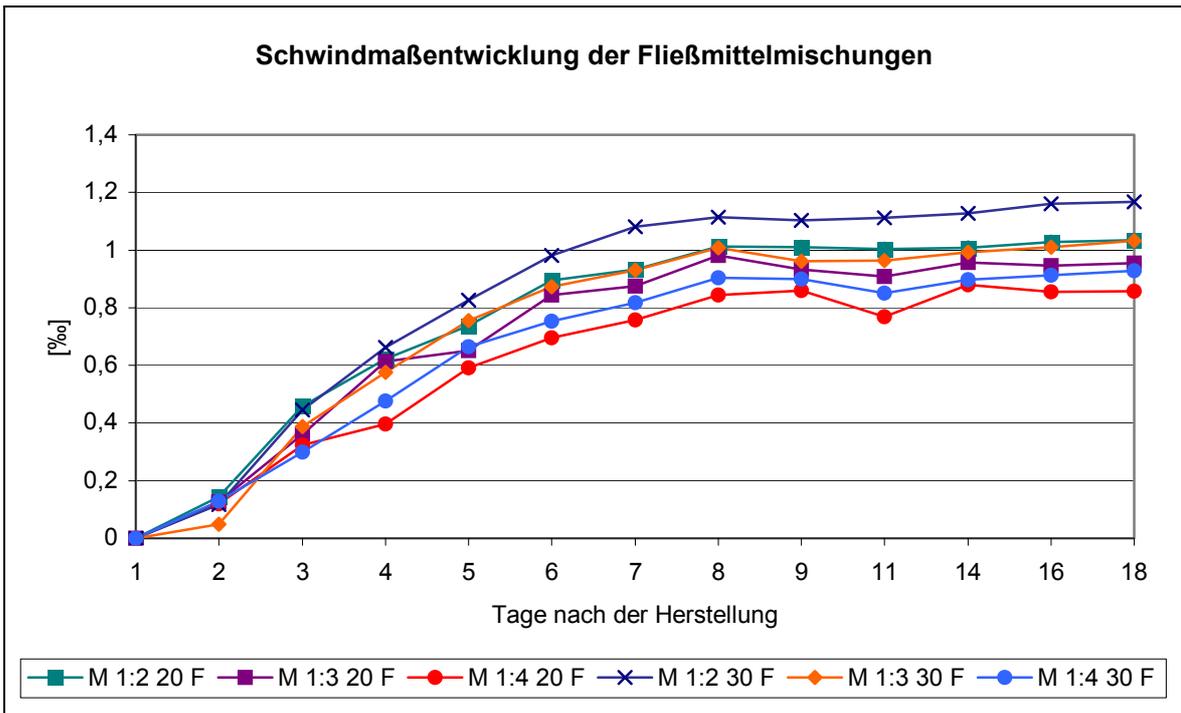
A. 61.2: Schwindmaße M 1:4 30 F

		Tage nach der Herstellung												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:4 30 FLP	A oben	0	0,014	0,04	0,056	0,071	0,081	0,087	0,096	0,095	0,084	0,093	0,094	0,095
M 1:4 30 FLP	A unten	0	0,013	0,033	0,054	0,072	0,082	0,09	0,101	0,1	0,089	0,098	0,1	0,101
Mittelwerte	A	0	0,0135	0,0365	0,055	0,0715	0,0815	0,0885	0,0985	0,0975	0,0865	0,0955	0,097	0,098
M 1:4 30 FLP	B oben	0	0,018	0,035	0,054	0,07	0,079	0,086	0,098	0,098	0,085	0,095	0,097	0,098
M 1:4 30 FLP	B unten	0	0,012	0,033	0,054	0,07	0,083	0,089	0,1	0,1	0,087	0,099	0,101	0,101
Mittelwerte	B	0	0,015	0,034	0,054	0,07	0,081	0,0875	0,099	0,099	0,086	0,097	0,099	0,0995
M 1:4 30 FLP	C oben	0	0,021	0,042	0,059	0,074	0,082	0,09	0,102	0,101	0,09	0,1	0,1	0,101
M 1:4 30 FLP	C unten	0	0,011	0,038	0,059	0,076	0,086	0,092	0,103	0,103	0,096	0,102	0,102	0,104
Mittelwerte	C	0	0,016	0,04	0,059	0,075	0,084	0,091	0,1025	0,102	0,093	0,101	0,101	0,1025
<b>Mittelwerte</b>														
<b>M 1:4 30 FLP</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,14833</b>	<b>0,36833</b>	<b>0,56</b>	<b>0,72167</b>	<b>0,82167</b>	<b>0,89</b>	<b>1</b>	<b>0,995</b>	<b>0,885</b>	<b>0,97833</b>	<b>0,99</b>	<b>1</b>

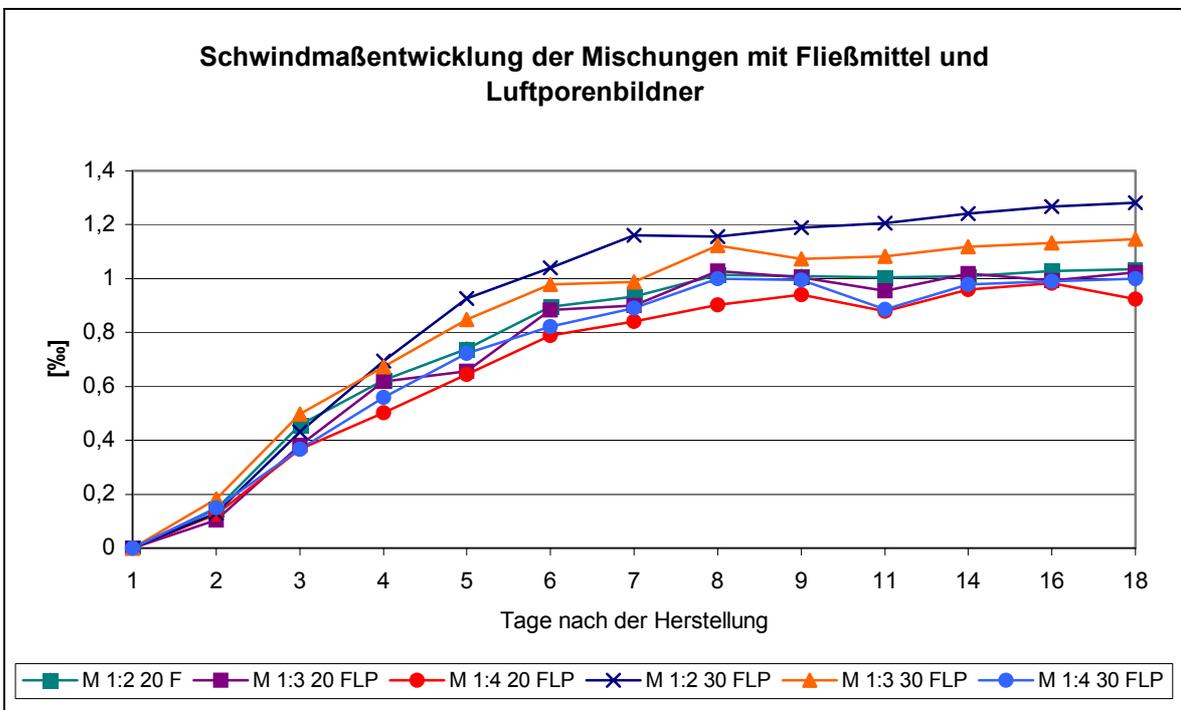
A. 62.1: Schwindmaße M 1:4 30 FLP

		Tage nach der Herstellung												
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	14	16	18
M 1:4 30	A oben	0	0,001	0,017	0,04	0,064	0,086	0,098	0,116	0,121	0,117	0,128	0,129	0,131
M 1:4 30	A unten	0	0,01	0,015	0,04	0,069	0,095	0,108	0,125	0,133	0,13	0,142	0,144	0,147
Mittelwerte	A	0	0,0055	0,016	0,04	0,0665	0,0905	0,103	0,1205	0,127	0,1235	0,135	0,1365	0,139
M 1:4 30	B oben	0	0,007	0,042	0,077	0,09	0,107	0,115	0,127	0,134	0,129	0,142	0,142	0,144
M 1:4 30	B unten	0	0,025	0,015	0,035	0,066	0,086	0,101	0,128	0,123	0,118	0,132	0,132	0,136
Mittelwerte	B	0	0,016	0,0285	0,056	0,078	0,0965	0,108	0,1275	0,1285	0,1235	0,137	0,137	0,14
M 1:4 30	C oben	0	0,001	0,02	0,052	0,079	0,096	0,108	0,122	0,128	0,123	0,135	0,136	0,138
M 1:4 30	C unten	0	0,002	0,017	0,045	0,074	0,09	0,103	0,117	0,12	0,116	0,129	0,129	0,131
Mittelwerte	C	0	0,0015	0,0185	0,0485	0,0765	0,093	0,1055	0,1195	0,124	0,1195	0,132	0,1325	0,1345
<b>Mittelwerte</b>														
<b>M 1:4 30</b>	<b>in [‰]</b>	<b>0</b>	<b>0,07667</b>	<b>0,21</b>	<b>0,48167</b>	<b>0,73667</b>	<b>0,93333</b>	<b>1,055</b>	<b>1,225</b>	<b>1,265</b>	<b>1,22167</b>	<b>1,34667</b>	<b>1,35333</b>	<b>1,37833</b>

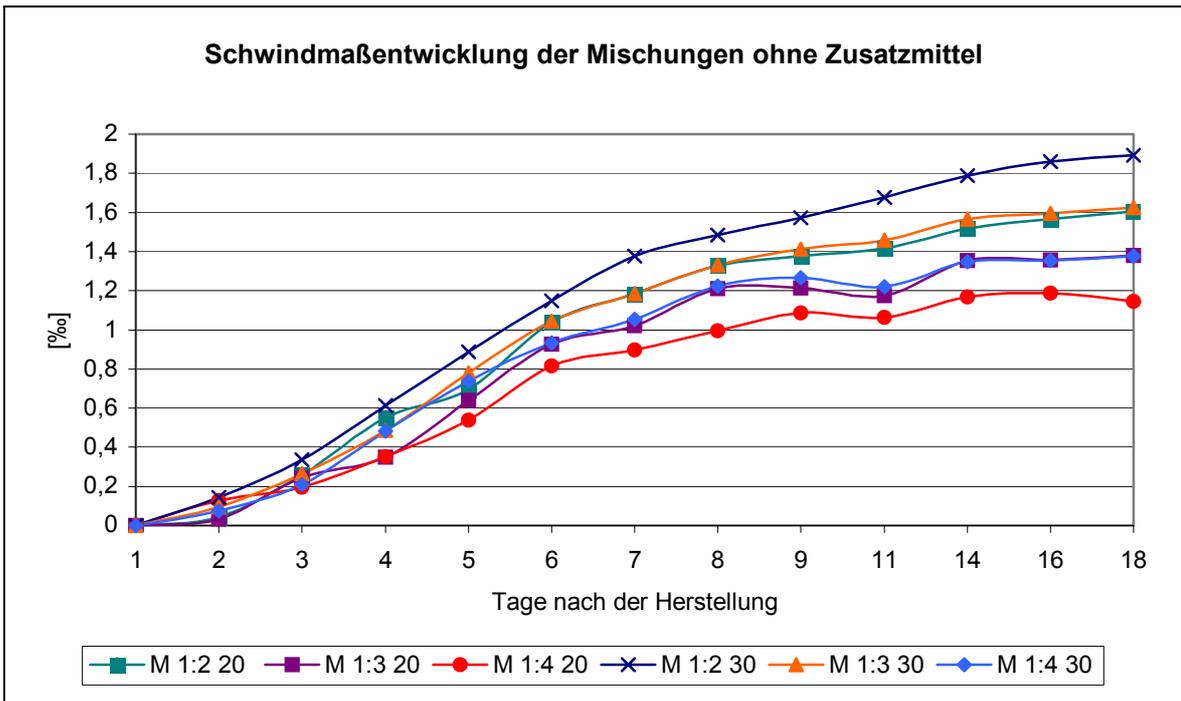
A. 62.2: Schwindmaße M 1:4 30 FLP



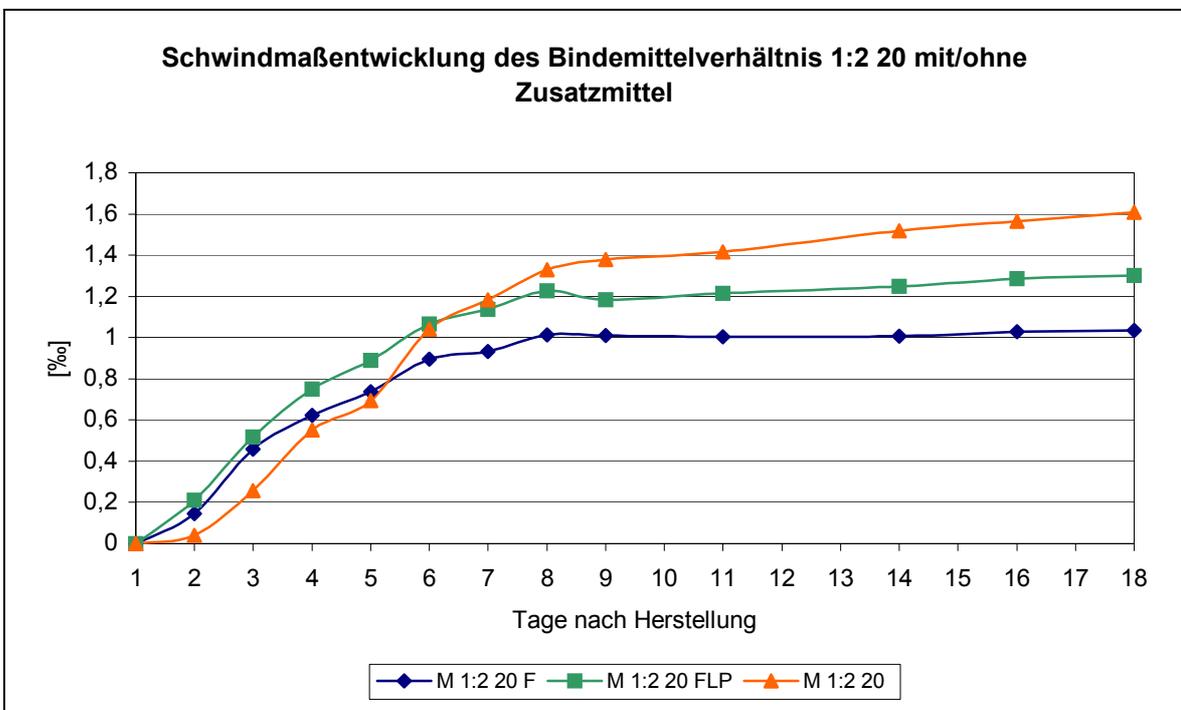
A. 63.1: Schwindmaßentwicklung der Fließmittelmischungen



A. 63.2: Schwindmaßentwicklung der Mischungen mit Fließmittel und Luftporenbildner



A. 64.1: Schwindmaßentwicklung der Mischungen ohne Zusatzmittel



A. 64.2: Schwindmaßentwicklung des Bindemittelverhältnis 1:2 mit 20 Gew.-% Kaolin mit/ohne Zusatzmittel

	Einwaage [ g ]	A	CaO unge- bunden [%]	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	Einwaage [ g ]	B	CaO unge- bunden [%]	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	Mittelwerte Ca(OH) <sub>2</sub>	Mittelwerte Mischungen
M 1:2 20 F	10,0068	6,1	1,71	2,26	10,0055	5,9	1,65	2,18	2,22	2,68
M 1:2 20 FLP	10,0041	7,6	2,13	2,81	10,0067	6,4	1,79	2,37	2,59	
M 1:2 20	10,0024	19,9	5,57	7,36	10,0046	8,7	2,43	3,22	3,22	
M 1:3 20 F	10,0038	6,5	1,82	2,40	10,0057	6,5	1,82	2,40	2,40	2,32
M 1:3 20 FLP	10,0009	5,9	1,65	2,18	10,0028	5,8	1,62	2,15	2,16	
M 1:3 20	10,0057	6,1	1,71	2,26	10,0024	6,9	1,93	2,55	2,40	
M 1:4 20 F	10,0078	4,4	1,23	1,63	10,0003	5,4	1,51	2,00	1,81	2,24
M 1:4 20 FLP	10,0015	6,1	1,71	2,26	10,0052	6,5	1,82	2,40	2,33	
M 1:4 20	10,0049	6,7	1,88	2,48	10,0095	7,2	2,01	2,66	2,57	
M 1:2 30 F	10,0088	4,8	1,34	1,77	10,0056	4,7	1,32	1,74	1,76	1,78
M 1:2 30 FLP	10,0034	4,4	1,23	1,63	10,0077	4,5	1,26	1,66	1,65	
M 1:2 30	10,0019	5,4	1,51	2,00	10,0062	5,1	1,43	1,89	1,94	
M 1:3 30 F	10,0066	4,3	1,20	1,59	10,0007	4,4	1,23	1,63	1,61	1,73
M 1:3 30 FLP	10,0036	4,8	1,34	1,78	10,0083	4,0	1,12	1,48	1,63	
M 1:3 30	10,0097	5,4	1,51	2,00	10,0043	5,2	1,46	1,92	1,96	
M 1:4 30 F	10,0075	5,2	1,45	1,92	10,0067	4,7	1,32	1,74	1,83	1,85
M 1:4 30 FLP	10,0006	5,1	1,43	1,89	10,0084	5	1,40	1,85	1,87	
M 1:4 30	10,0022	5,2	1,46	1,92	10,0032	4,8	1,34	1,78	1,85	

A. 65.1: Bestimmung von ungebundenen CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> nach 2 Tagen

	Einwaage [ g ]	A	CaO unge- bunden [%]	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	Einwaage [ g ]	B	CaO unge- bunden [%]	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	Mittelwerte Ca(OH) <sub>2</sub>	Mittelwerte Mischungen
M 1:2 20 F	10,0035	5,1	1,43	1,89	10,0041	5,0	1,40	1,85	1,87	1,97
M 1:2 20 FLP	10,0037	5,3	1,48	1,96	10,0039	5,7	1,60	2,11	2,03	
M 1:2 20	10,0007	6,2	1,74	2,29	10,0029	4,6	1,29	1,70	2,00	
M 1:3 20 F	10,0034	5,3	1,48	1,96	10,0068	4,6	1,29	1,70	1,83	2,05
M 1:3 20 FLP	10,0010	6,1	1,71	2,26	10,0095	8,6	2,41	3,18	2,26	
M 1:3 20	10,0022	5,9	1,65	2,18	10,0012	5,2	1,46	1,92	2,05	
M 1:4 20 F	10,0029	4,3	1,20	1,59	10,0011	4,3	1,20	1,59	1,59	1,62
M 1:4 20 FLP	10,0002	4,8	1,34	1,78	10,0014	4,4	1,23	1,63	1,70	
M 1:4 20	10,0044	3,8	1,06	1,41	10,0012	4,6	1,29	1,70	1,55	
M 1:2 30 F	10,0032	4,4	1,23	1,63	10,0019	3,1	0,87	1,15	1,39	1,26
M 1:2 30 FLP	10,0042	3,6	1,01	1,33	10,0010	3,5	0,98	1,29	1,31	
M 1:2 30	10,0033	3,3	0,92	1,22	10,0020	2,6	0,73	0,96	1,09	
M 1:3 30 F	10,0005	2,9	0,81	1,07	10,0002	2,4	0,67	0,89	0,98	1,13
M 1:3 30 FLP	10,0011	3,0	0,84	1,11	10,0013	2,5	0,70	0,92	1,02	
M 1:3 30	10,0034	4,9	1,37	1,81	10,0024	2,7	0,76	1,00	1,41	
M 1:4 30 F	10,0045	3,5	0,98	1,29	10,0024	2,8	0,78	1,04	1,17	1,15
M 1:4 30 FLP	10,0006	3,5	0,98	1,29	10,0035	2,6	0,73	0,96	1,13	
M 1:4 30	10,0020	3,5	0,98	1,29	10,0034	2,8	0,78	1,04	1,17	

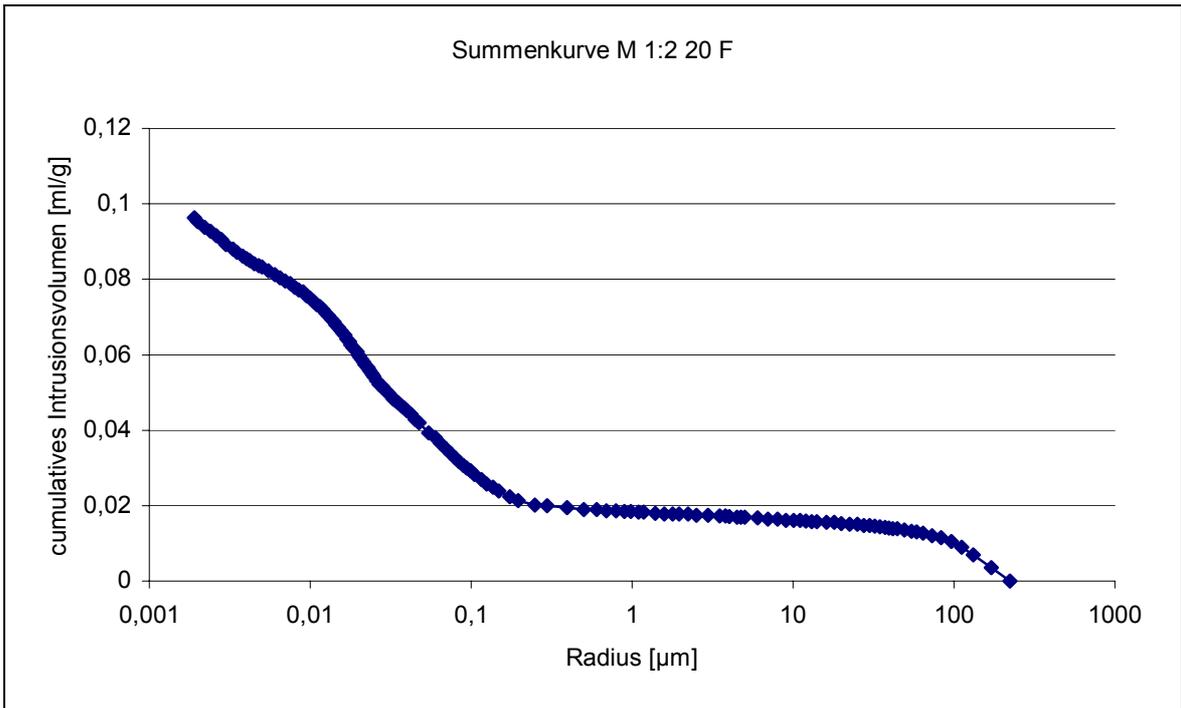
A. 66.1: Bestimmung von ungebundenen CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> nach 7 Tagen

	Einwaage [ g ]	A	CaO unge- bunden [%]	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	Einwaage [ g ]	B	CaO unge- bunden [%]	Ca(OH) <sub>2</sub> [%]	Mittelwerte Ca(OH) <sub>2</sub>	Mittelwerte Mischungen
M 1:2 20 F	10,0026	4,4	1,23	1,63	10,0015	4,5	1,26	1,66	1,65	1,79
M 1:2 20 FLP	10,0092	4,9	1,37	1,81	10,0096	4,7	1,31	1,74	1,77	
M 1:2 20	10,0020	4,9	1,37	1,81	10,0061	5,6	1,57	2,07	1,94	
M 1:3 20 F	10,0019	4,3	1,20	1,59	10,0050	4,7	1,32	1,74	1,66	1,67
M 1:3 20 FLP	10,0039	4,2	1,18	1,55	10,0055	4,6	1,29	1,70	1,63	
M 1:3 20	10,0025	4,4	1,23	1,63	10,0083	4,9	1,37	1,81	1,72	
M 1:4 20 F	10,0060	3,9	1,09	1,44	10,0096	3,9	1,09	1,44	1,44	1,58
M 1:4 20 FLP	10,0025	5,1	1,43	1,89	10,0005	5,2	1,46	1,92	1,91	
M 1:4 20	10,0084	3,5	0,98	1,29	10,0034	4,0	1,12	1,48	1,39	
M 1:2 30 F	10,0060	3,6	1,01	1,33	10,0020	3,7	1,04	1,37	1,35	1,32
M 1:2 30 FLP	10,0065	4,2	1,18	1,55	10,0030	3,8	1,06	1,41	1,48	
M 1:2 30	10,0075	2,9	0,81	1,07	10,0048	3,2	0,90	1,18	1,13	
M 1:3 30 F	10,0057	3,3	0,92	1,22	10,0034	4,2	1,18	1,55	1,39	1,22
M 1:3 30 FLP	10,0076	3,0	0,84	1,11	10,0094	3,2	0,90	1,18	1,15	
M 1:3 30	10,0086	2,8	0,78	1,04	10,0045	3,3	0,92	1,22	1,13	
M 1:4 30 F	10,0073	3,0	0,84	1,11	10,0072	3,5	0,98	1,29	1,20	1,14
M 1:4 30 FLP	10,0084	2,6	0,73	0,96	10,0057	3,3	0,92	1,22	1,09	
M 1:4 30	10,0009	3,3	0,92	1,22	10,0024	2,8	0,78	1,04	1,13	

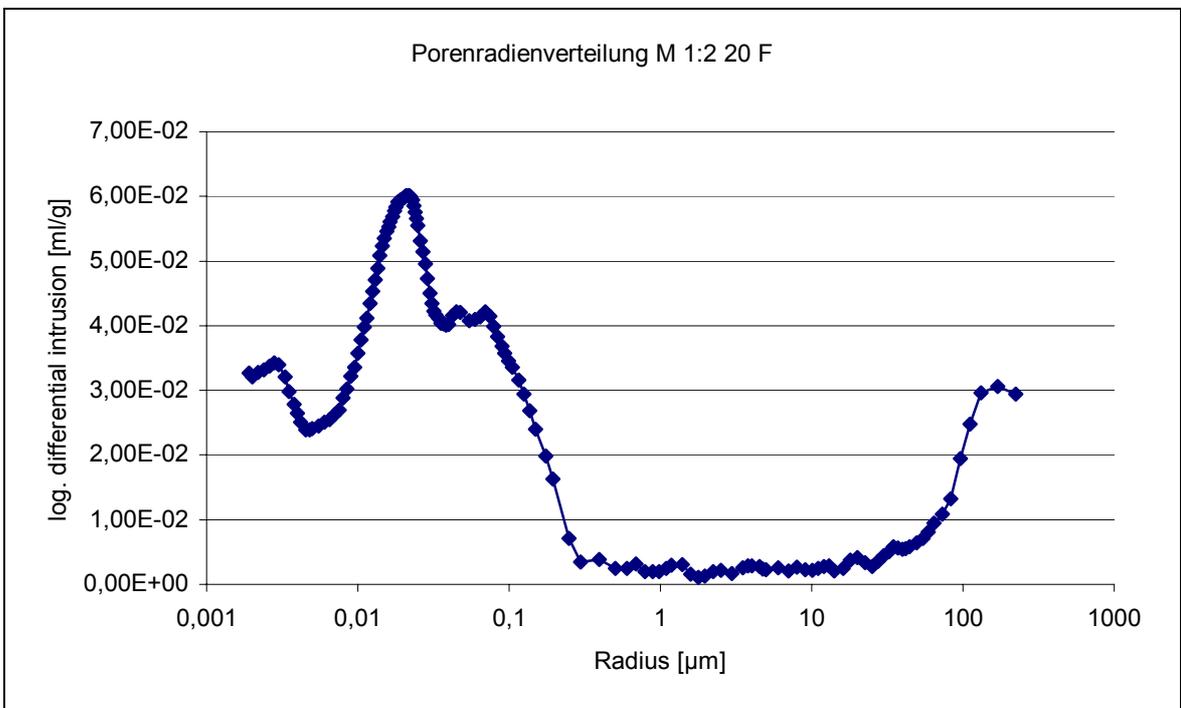
A. 67.1: Bestimmung von ungebundenen CaO/Ca(OH)<sub>2</sub> nach 28 Tagen

		Gewicht vor Wasseraufnahme [g]	Gewicht nach Wasseraufnahme [g]	Wasseraufnahme [g]	Wasseraufnahme [%]	Mittelwert je Mischung [%]
M 1:2 20 F	A	526,23	536,63	10,4	1,98	2,10
M 1:2 20 F	B	534,83	546,4	11,57	2,16	
M 1:2 20 F	C	540,87	552,6	11,73	2,17	
M 1:2 20 FLP	A	428,44	443,37	14,93	3,48	3,46
M 1:2 20 FLP	B	425,45	439,51	14,06	3,30	
M 1:2 20 FLP	C	425,37	440,59	15,22	3,58	
M 1:2 20	A	446,25	492,73	46,48	10,42	10,52
M 1:2 20	B	450,17	496,6	46,43	10,31	
M 1:2 20	C	449,38	498	48,62	10,82	
M 1:3 20 F	A	533,83	549,94	16,11	3,02	2,97
M 1:3 20 F	B	532,08	548,03	15,95	3,00	
M 1:3 20 F	C	530,80	546,15	15,35	2,89	
M 1:3 20 FLP	A	512,25	523,42	11,17	2,18	2,43
M 1:3 20 FLP	B	503,11	515,55	12,44	2,47	
M 1:3 20 FLP	C	501,29	514,51	13,22	2,64	
M 1:3 20	A	454,26	512,5	58,24	12,82	12,35
M 1:3 20	B	457,97	513,23	55,26	12,07	
M 1:3 20	C	454,17	509,41	55,24	12,16	
M 1:4 20 F	A	532,58	556,75	24,17	4,54	4,39
M 1:4 20 F	B	532,72	556,6	23,88	4,48	
M 1:4 20 F	C	528,03	549,94	21,91	4,15	
M 1:4 20 FLP	A	456,52	479,2	22,68	4,97	5,15
M 1:4 20 FLP	B	465,03	488,28	23,25	5,00	
M 1:4 20 FLP	C	453,90	478,75	24,85	5,47	
M 1:4 20	A	459,33	520,34	61,01	13,28	12,79
M 1:4 20	B	462,67	521,28	58,61	12,67	
M 1:4 20	C	467,18	525,25	58,07	12,43	
M 1:2 30 F	A	529,12	546,39	17,27	3,26	3,35
M 1:2 30 F	B	521,45	539,59	18,14	3,48	
M 1:2 30 F	C	526,06	543,45	17,39	3,31	
M 1:2 30 FLP	A	483,95	501,66	17,71	3,66	3,56
M 1:2 30 FLP	B	482,63	499,72	17,09	3,54	
M 1:2 30 FLP	C	477,89	494,57	16,68	3,49	
M 1:2 30	A	439,92	495,8	55,88	12,70	12,38
M 1:2 30	B	442,49	497,79	55,3	12,50	
M 1:2 30	C	443,44	496,36	52,92	11,93	
M 1:3 30 F	A	524,76	544,68	19,92	3,80	3,60
M 1:3 30 F	B	524,56	545,7	21,14	4,03	
M 1:3 30 F	C	525,65	541,32	15,67	2,98	
M 1:3 30 FLP	A	476,12	497,34	21,22	4,46	4,69
M 1:3 30 FLP	B	477,8	500,57	22,77	4,77	
M 1:3 30 FLP	C	483,76	507,19	23,43	4,84	
M 1:3 30	A	445,77	502,75	56,98	12,78	12,59
M 1:3 30	B	446,22	502,33	56,11	12,57	
M 1:3 30	C	444,12	499,19	55,07	12,40	
M 1:4 30 F	A	521,46	549,45	27,99	5,37	5,12
M 1:4 30 F	B	524,66	551,07	26,41	5,03	
M 1:4 30 F	C	531,9	558,24	26,34	4,95	
M 1:4 30 FLP	A	479,18	508,14	28,96	6,04	5,74
M 1:4 30 FLP	B	476,52	503,63	27,11	5,69	
M 1:4 30 FLP	C	478,94	505,25	26,31	5,49	
M 1:4 30	A	437,9	502,15	64,25	14,67	14,36
M 1:4 30	B	449,43	512,2	62,77	13,97	
M 1:4 30	C	446,47	510,92	64,45	14,44	

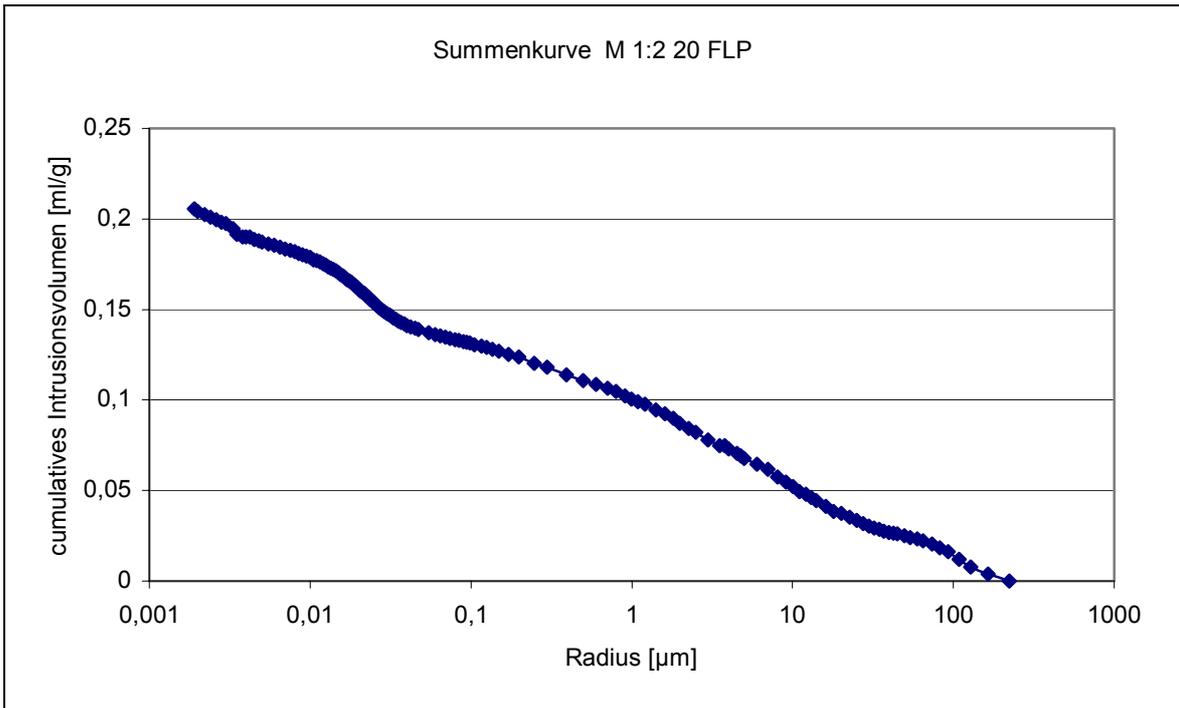
A. 68. 1: Wasseraufnahme unter Atmosphärendruck



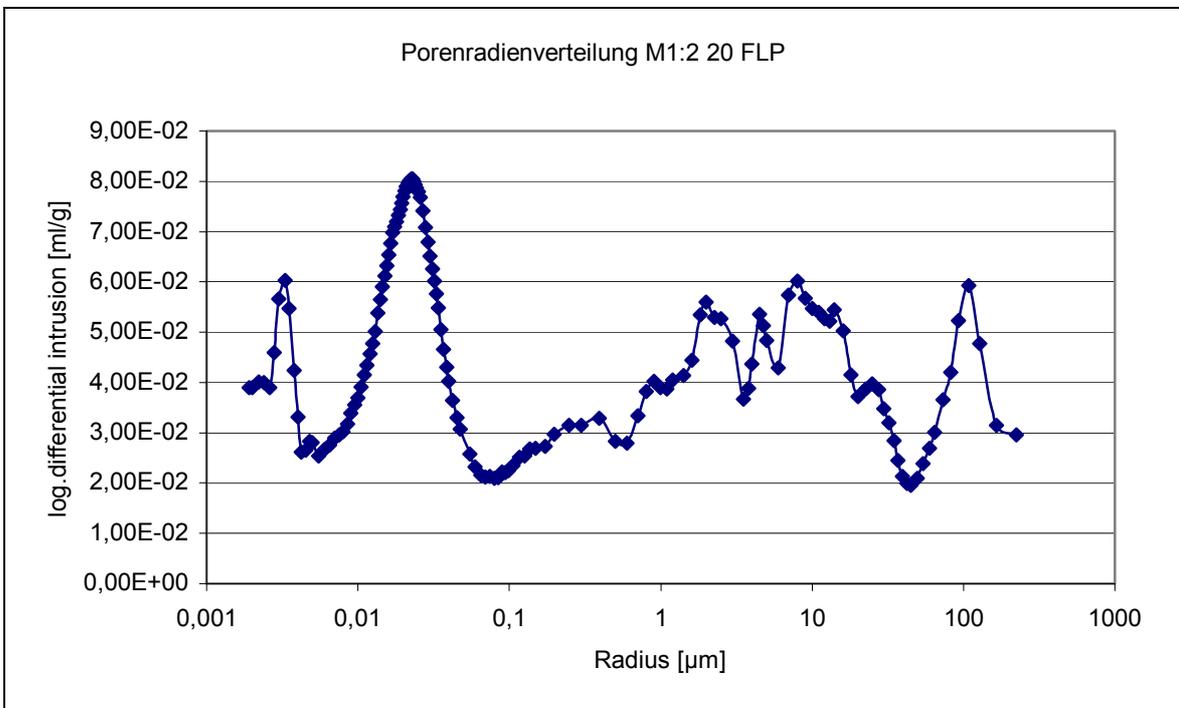
A. 69.1: Summenradien M 1:2 20 F



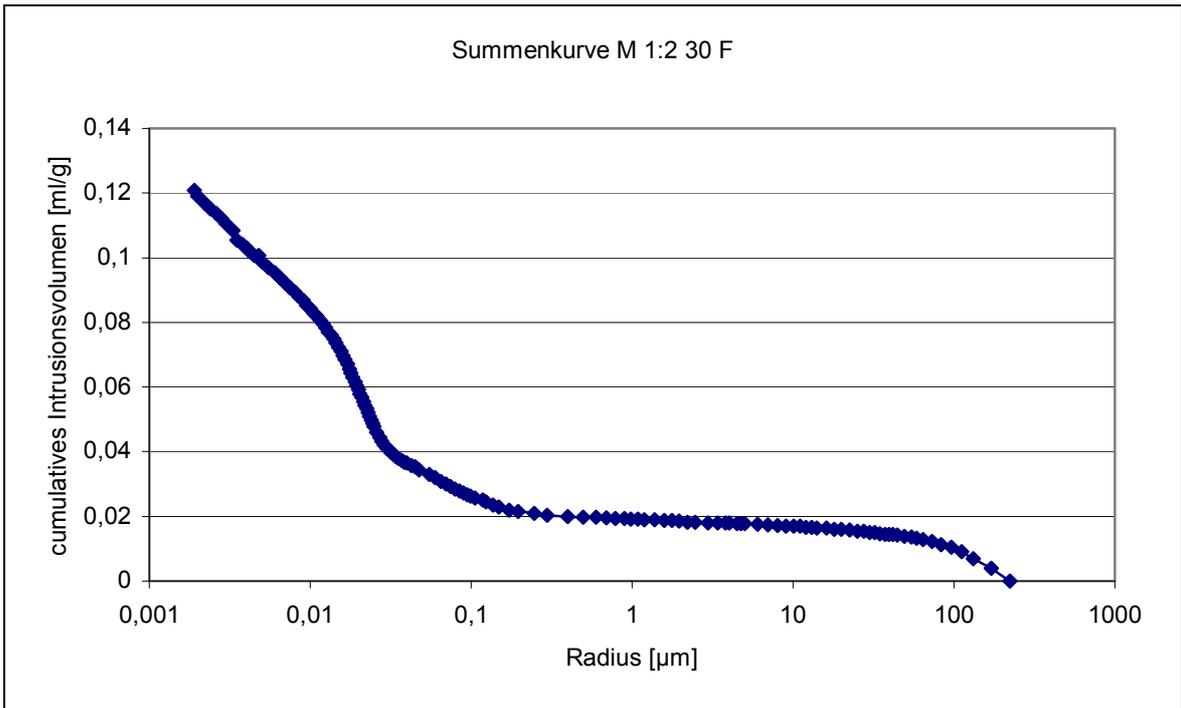
A. 69.2: Porenradienverteilung M 1:2 20 F



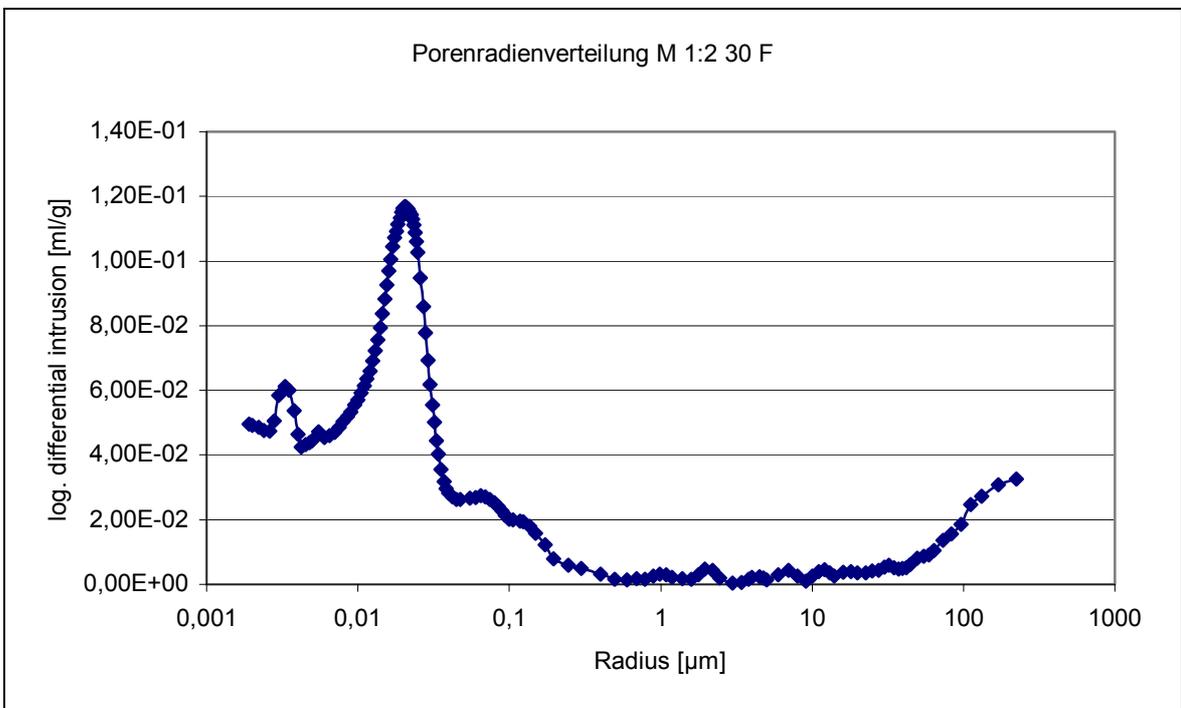
A. 70.1: Summenkurve M 1:2 20 FLP



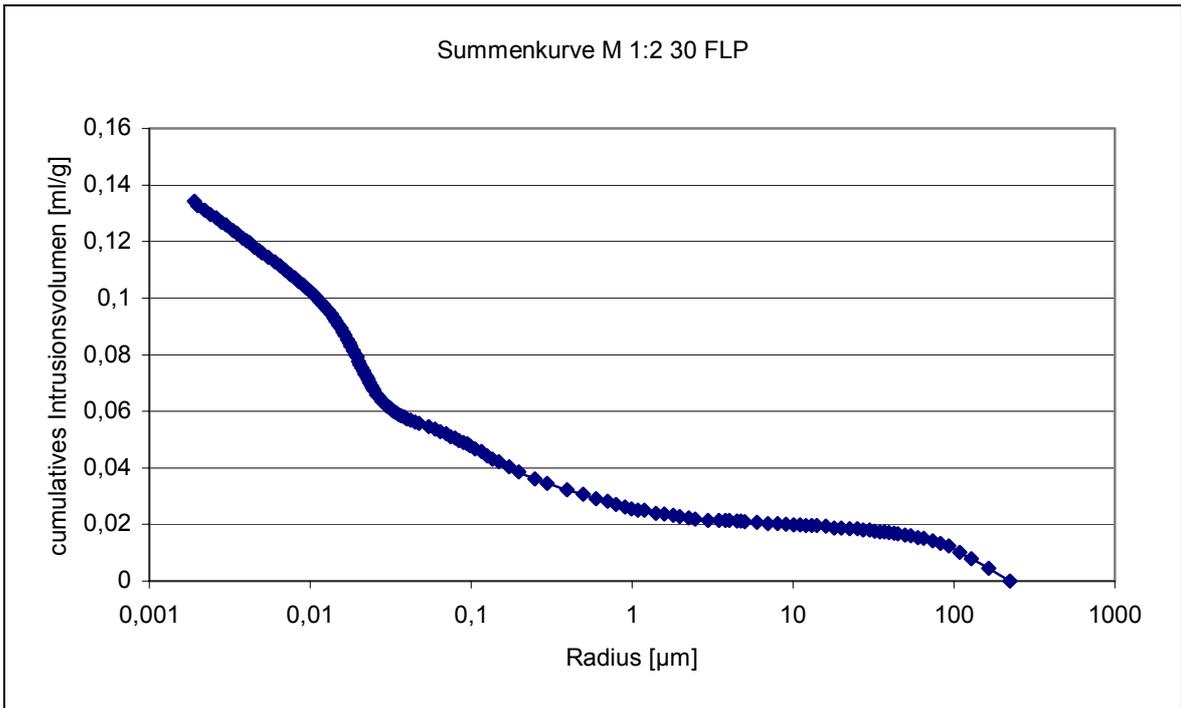
A. 70.2: Porenradienverteilung M 1:2 20 FLP



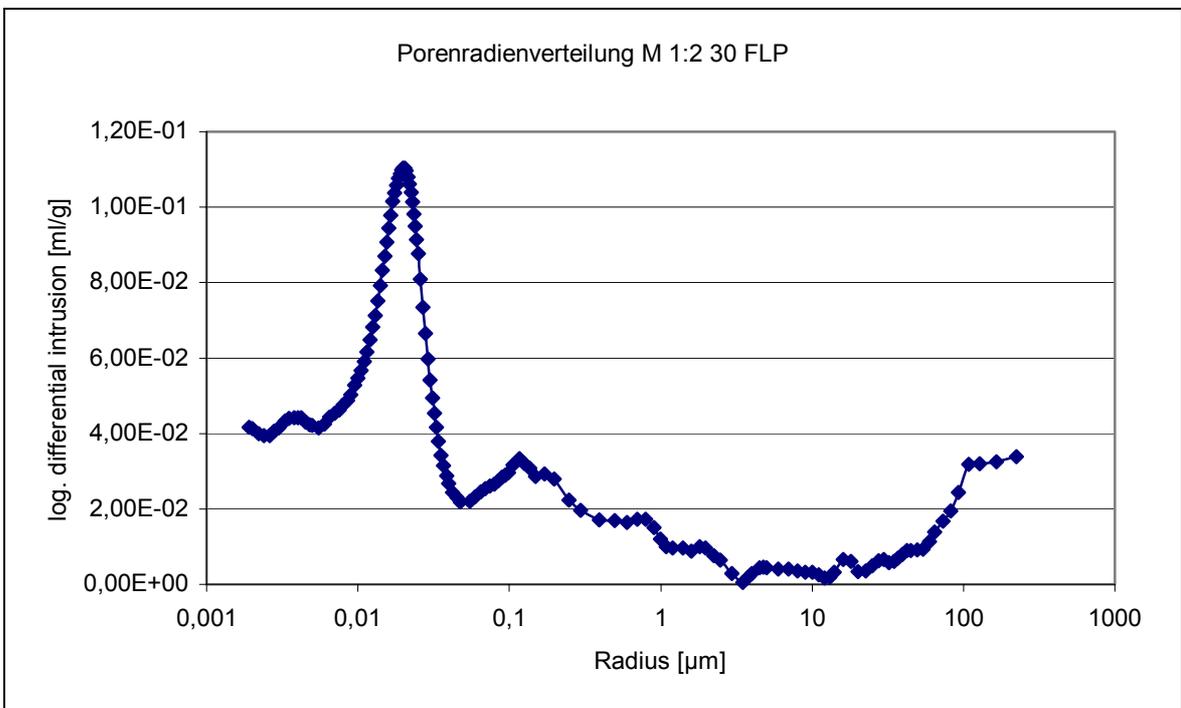
A. 71.1: Summenkurve M1:2 30 F



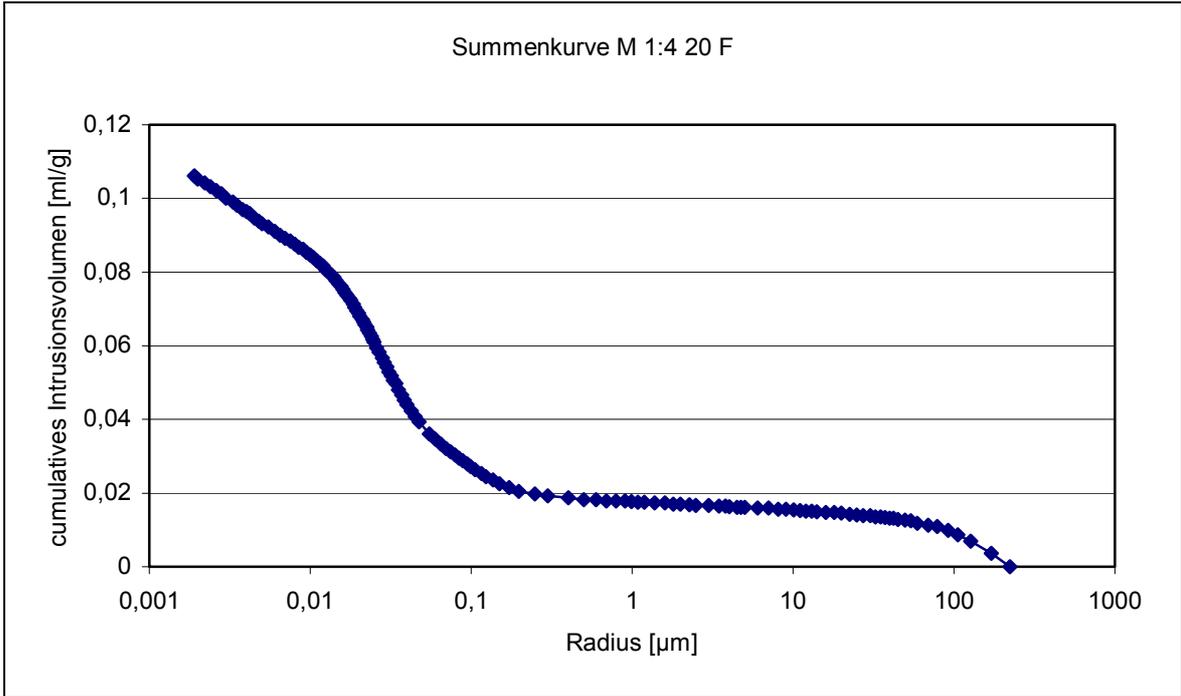
A. 71.2: Porenradienverteilung M 1:2 30 F



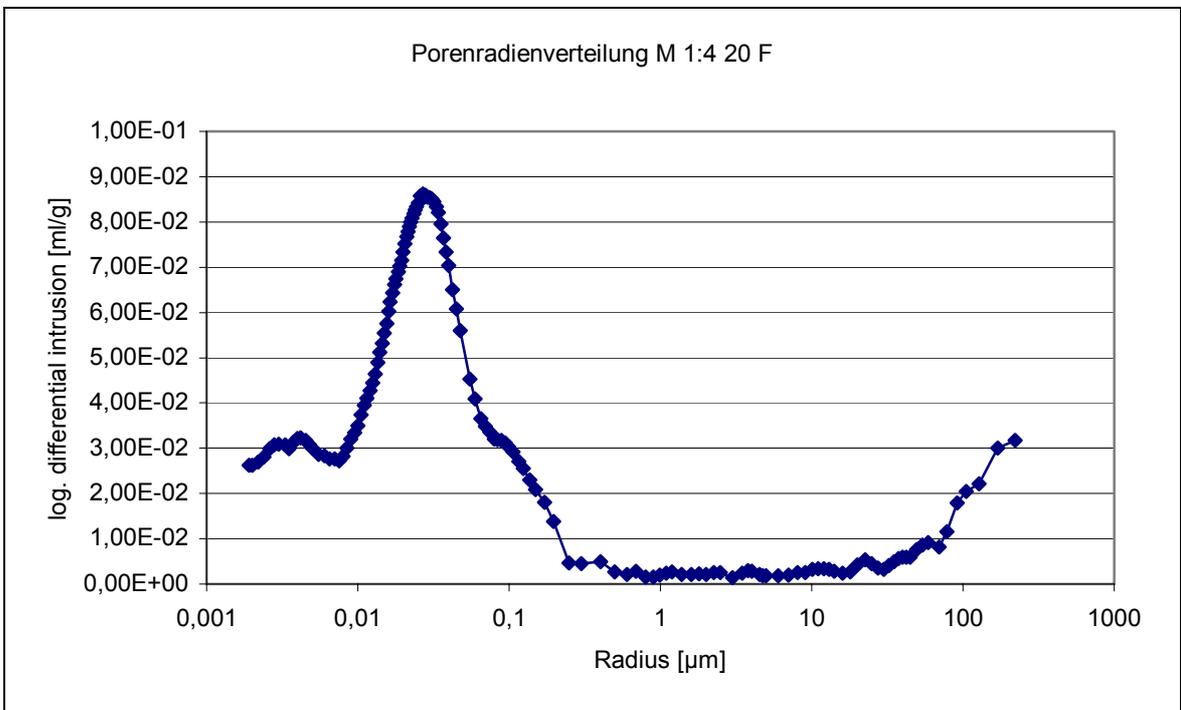
A. 72.1: Summenradien M 1:2 30 FLP



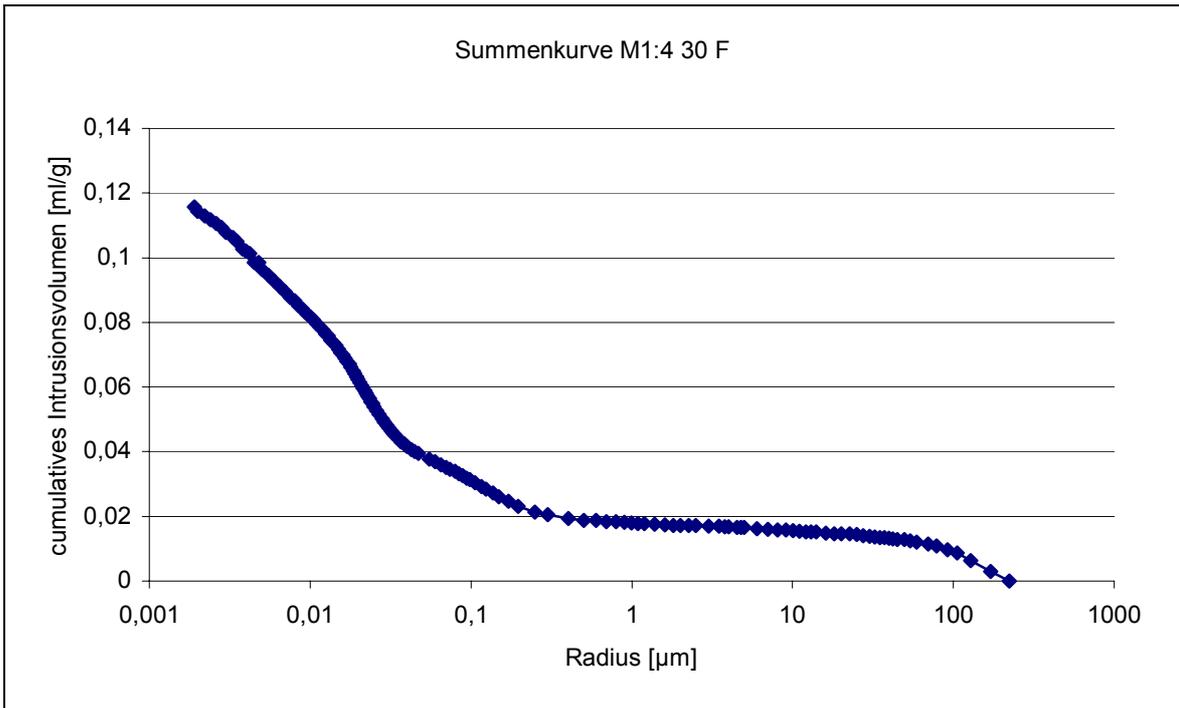
A. 72.2: Porenradienverteilung M 1:2 30 FLP



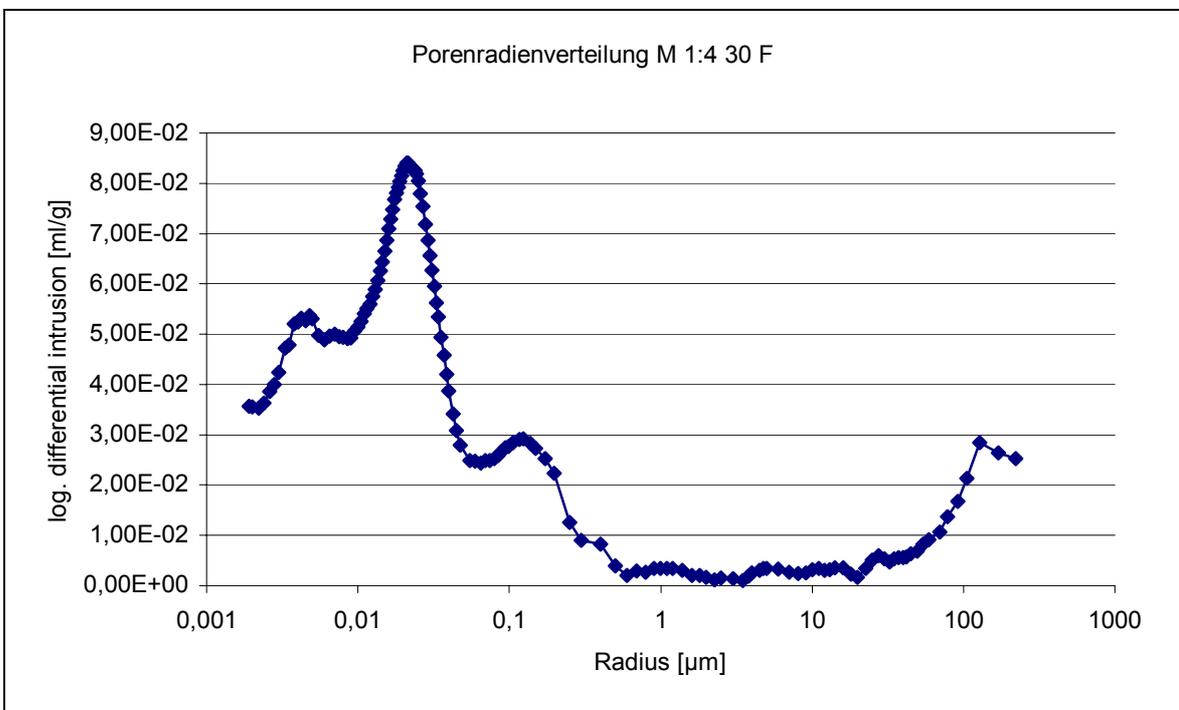
A. 73.1: Summenkurven M 1:4 20 F



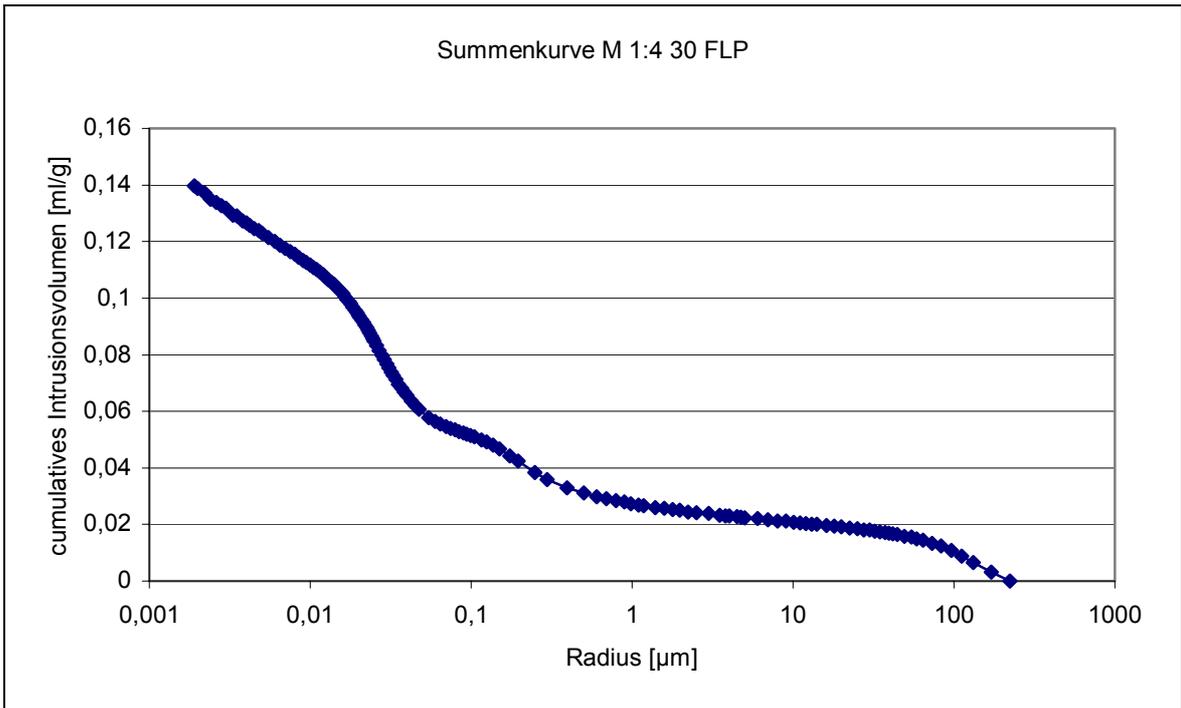
A. 73.2: Porenradienverteilung M 1:4 20 F



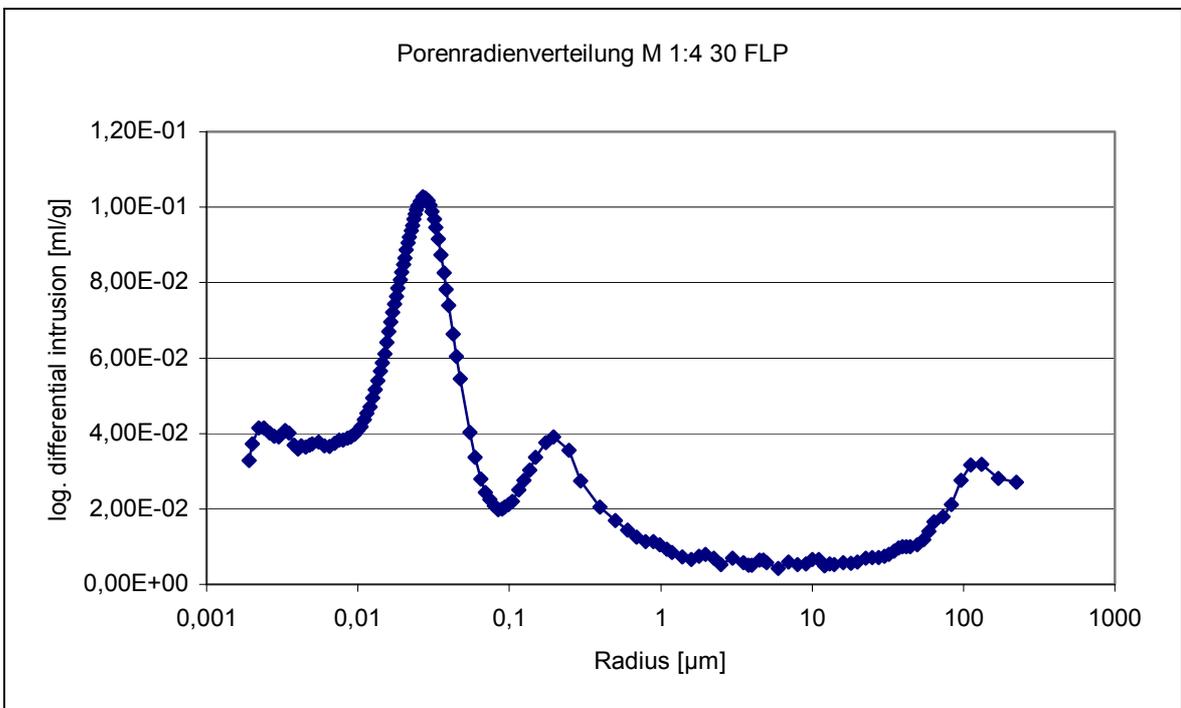
A. 74.1: Summenkurve M 1:4 30 F



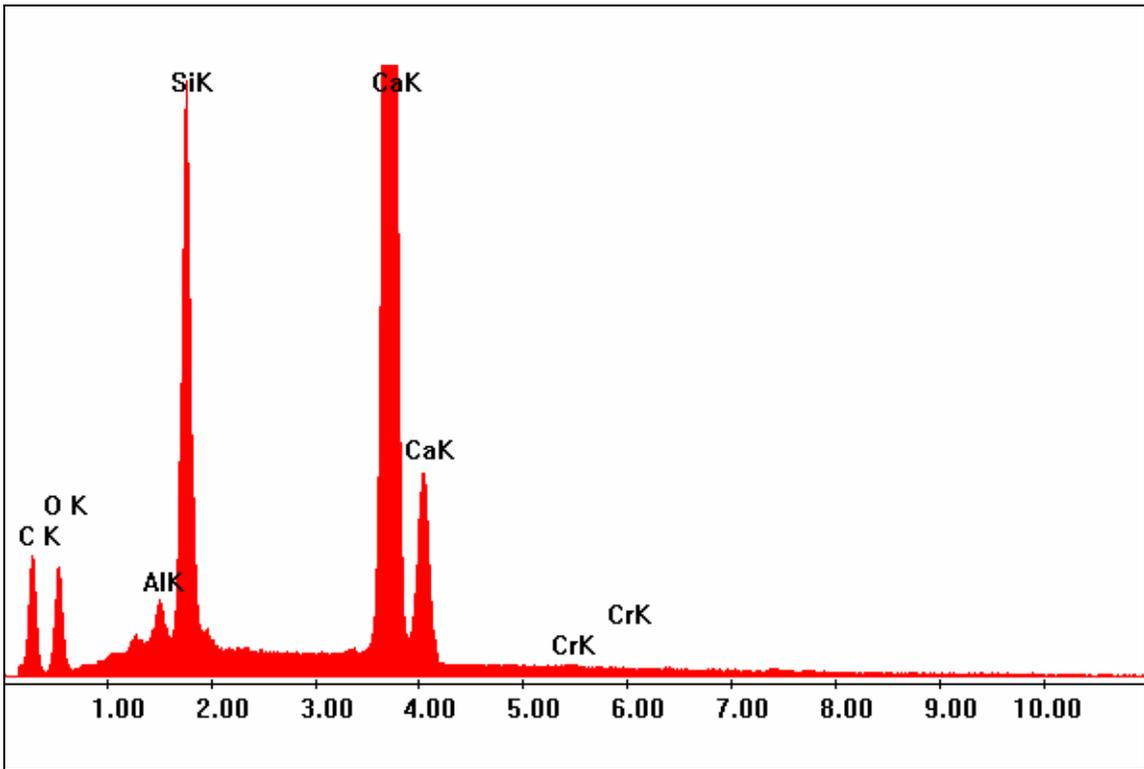
A. 74.2: Porenradienverteilung M 1:4 30 F



A. 75.1: Summenkurve M 1:4 30 FLP



A. 75.2: Porenradienverteilung M 1:4 30 FLP



A. 76.1: Röntgenanalyse eines unhydratisierten Zementkornes (vgl. REM)



A 77.1: grobkörniger Marmorzylinder mit/ ohne Favoritenmörtel  
Es lassen sich keine Verfärbungen des Marmors durch die Zugabe des Mörtels erkennen.



A 77.2: mittelkörniger Dolomitmarmor mit/ohne Favoritenmörtel  
Der Dolomitmarmor bekommt eine leicht gelblich Färbung durch das Einwirken des Mörtel bzw. der Feuchtigkeit des Mörtels. Diese verschwindet vermutlich mit der Trocknung.  
Diese Bilder geben beispielhaft das Verhalten des Marmors für alle Favoritenmischungen (vgl. Tab.8) wieder.



## Anlage 11

Development of compatible mortars for the restoration  
of the Market Gate of Milet, Pergamon Museum Berlin,  
Germany.

Middendorf, B., Maack, V. & Siegesmund S.



# DEVELOPMENT OF COMPATIBLE MORTARS FOR THE RESTORATION OF THE MARKET GATE OF MILET, PERGAMON MUSEUM BERLIN, GERMANY

Bernhard Middendorf<sup>(1)</sup>, Verena Maack<sup>(1)</sup> & Siegfried Siegesmund<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Department of Structural Materials, Univeristy Kassel, Moenchebergstrasse 7, 34109 Kassel, Germany, email: midden@uni-kassel.de

<sup>(2)</sup>Geoscience Centre of the University of Göttingen, Goldschmidtstrasse 3, 37077 Göttingen, Germany, email: ssieges@gwdg.de

## ABSTRACT

*Damages of the Market Gate of Milet make a restoration indispensable. Therefore the Market Gate will be back-build and rebuild in near future. For the reconstruction of the columns special mortars are necessary which must be compatible to the marble and steel construction. Restoration mortars with adapted colour, physico-mechanical and chemical-mineralogical properties as well as with sufficient pH-values to prevent steel corrosion were developed. Mortars with binder mixtures of pozzolanic materials and white cement combined with defined aggregates and chemical additives fulfill the mentioned requirements. These mortars were successfully tested in small scale columns by using original materials under defined climatic conditions.*

## KEY WORDS

*restoration mortar, white cement, pozzolana, marble, column structure*

## INTRODUCTION

The Market Gate of Milet was probably built in the twenties of the second century a. Chr. at the state market of the city Milet. After the Market Gate had been integrated into the late antique city wall during Byzantine time, an earthquake destroyed Milet and with it also the Market Gate. After the excavation of the gate 1903, parts of the gate were given to the Turkish authorities. 1925 over a reconstructed pedestal, the gate was rebuilt with the remaining original marble fragments in the Pergamon Museum Berlin (Fig. 1).



Fig. 1: The Market Gate of Miletus, Pergamon Museum Berlin.

The lacking parts were replaced with stone supplement cementitious based materials. In order to guarantee the constructive stability of the gate, the marble columns were hollowed by core drilling. Into the emerging cavity of the columns, a steel construction was integrated and filled with mortar or was replenished partially with ceramic form stones. The pedestal and the ceiling consists of steel concrete constructions, which are covered with original marble fragments (Fig. 2). During 2<sup>nd</sup> World War the Market Gate was damaged. The subsequent restoration took two years. However the damages like cracks and efflorescences became increasingly more serious in the meantime. Nowadays the Market Gate should be total restored, that means it will be back-built and rebuild later on. Preinvestigations to characterize the building materials and the structural conditions are promoted by the German Environmental Association (DBU). One part of this project is the chemical-mineralogical and physico-mechanical characterisation of the used building materials with the aim to develop compatible restoration mortars for the rebuild.

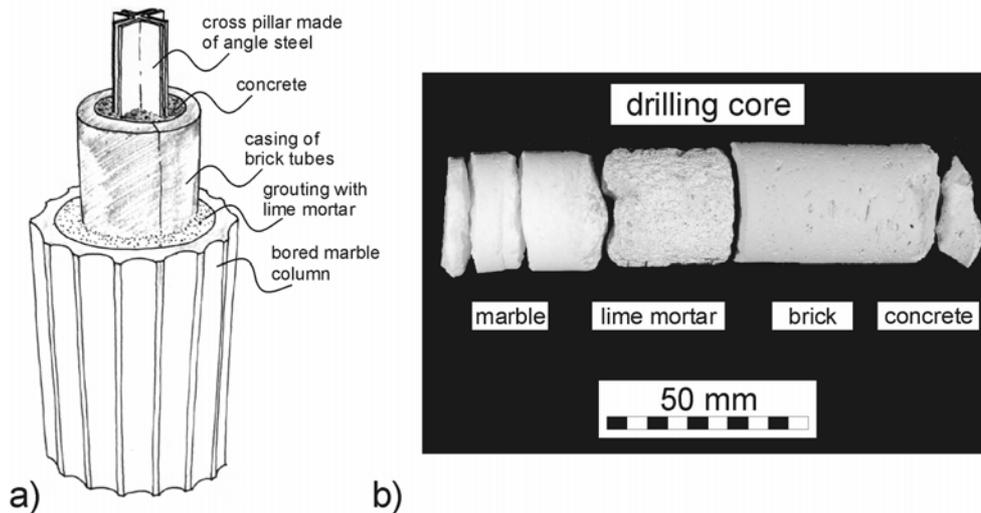


Fig. 2: (a) Schematic sketch of current steel concrete construction of a column (from Dr. Pfanner) and (b) drilling core of a column with typical material sequence of marble, lime mortar, brick and concrete.

## AIM

The physico-mechanical and chemical-mineralogical adaptation of a restoration mortar to the stone minimizes damages. Strength and elasticity of the mortars must be adapted to the marble otherwise disturbances at the marble/mortar zone are pre-programmed. Furthermore, the shrinking should be minimized in order to guarantee a well interlocking system. The  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content should be as low as possible to prevent a decolouration of the marble and to minimize efflorescences. But a minimum of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  had to exist to protect the steel from corrosion. The mortar should be self compacting to relief the structure in the columns. For the reduction of loads, the density should be as low as possible. The mortar should not be inclined to bleeding, because a penetration of the pore solution can result changes in the colour of marble or in marble structure, e.g. an extension between the grain-grain-zones. Therefore a dedicated binder/aggregate mixture including chemical additives (Kleen 1999) was developed.

The following materials with the named qualities and effects were used:

white cement, type CEM I 52,5

- normal strength development
- normal hydration heat
- high fineness
- white colour

calcinated clay with high pozzolanic reactivity to reduce  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content

- low density
- high fineness
- white colour

quartz sand

- high chemical purity
- high mechanical solidity
- well fitting grain size distribution

limestone powder

- high purity
- high whiting rate
- well fitting grain size distribution

plasticizer

- colourlessness
- reduction of the water during application

air entrainer

- adding air voids to reduce mortar density

## **MORTAR COMPOSITION**

The mortars were produced by using a binder/aggregate ratio of 1/2, 1/3 and 1/4 and by adding a calcinated clay content of 20 or 30 wt.-% (Wild & Khatib 1997). The limestone powder / quartz sand ratio was 2/3. From each mixture, one mortar was composed with plasticizer, one with plasticizer and air entrainer and one without additives.

## **RESULTS OF THE FRESH MORTAR DETERMINATIONS**

All mortars were adjusted to an uniform spreading capacity (acc. DIN EN 1053-3) of 24-25 cm in order to guarantee a spilling of the mortar. The mortars were composed with a minimum water content by using plasticizer and the air entrainer. The maximum water/binder ratio was 0.48. The air pore content (acc. DIN 18555-2) of the mortars with plasticizers was at about 3 vol.-%, for mortars without additives less than 1 vol.-%. The air pore content of the combined mixtures with plasticizer and air entrainer differed strongly in a range of 10 – 22 vol.-%, because of incompatibility of these additives. The shortest workability time (acc. DIN EN 1015-9) amounts to 20 min (mortars with plasticizer) and can be attributed to the short effectiveness of the plasticizers on the basis of melamine sulphonate. An filling in and processing of the mortar can hardly be done in this time, further investigations are necessary.

## **RESULTS OF THE HARDENED MORTAR DETERMINATIONS**

Efflorescences were not found on any of the examined mortars after watering cycles. The mercury intrusion porosimetry supports the supposition of the incompatibility of plasticizer

with the air entrainer, because multiplied number of undesired capillary pores were formed by the combined use of both. The mortars with a binder/sand ratio of 1/4 and plasticizer (M1:4 F) showed the lowest shrinking of about 0,9 ‰ after 28 days (Table 1). The mortars do not shrink much; no shrinkage cracks could be detected in the mortar specimens as well as on the contact zone of mortar/marble samples.

As another criterion for the selection of suitable mixtures, the compressive strength should be adapted to the marble which had a compressive strength of 59 N/mm<sup>2</sup>.

Table 1: Mortar mixtures

	Comp. strength 28 days [N/mm <sup>2</sup> ]	Shrinking 28 days [‰]
M 1:4 F with 20 wt.-% calcinated clay	50.6	0.86
M 1:4 F with 30 wt.-% calcinated clay	52.8	0.93

In the favourite mixtures low Ca(OH)<sub>2</sub>-contents of 1.2 to 2.7 wt.-% were measured which results in the low cement and high calcinated clay content. Carbonisation tests by using an alcoholic phenolphthaleine solution have shown, that the mortars have a sufficient pH-value to protect the steel which will be used for reinforcement in the structure.

### COMPATIBILITY MARBLE / MORTAR

Aim of this determination was the recognition of possible changes in colour of the marble caused by pore solution of the mortar. In order to be able to clarify this question, the production of thin cuts with original marble embedded in binder matrix were necessary. For the preparation of the samples for compatibility measurements the original marble was carefully grained into small pieces with a grain-size of 2–4 mm by using a pincers. Only pure white grains were used. The marble binder mixtures are produced with a binder / marble ratio of 1/2. Because of the high cement and the relatively low content of calcinated clay (20 wt.-%) this mixture had the highest Ca(OH)<sub>2</sub> content.

For the production of the specimens, prisms 4\*4\*16 cm<sup>3</sup> were prepared acc. DIN 1164-7. Two days after the preparation, the marble mortar prisms were divided into three parts. One part was stored in the climate with a temperature of 20°C and a relative humidity of 65 % (20/65) The second part was stored in a saturated Ca(OH)<sub>2</sub> solution and the third part was stored into distilled water. After 28 days storage thin sections were prepared from the thin cut samples. By using different microscopic techniques (optical and petrographic microscope) the changes in colour and structure were determined. Neither changes in colour nor other decompositions of the marble could be detected.

An examination of the compatibility of the marble with the used additives for the mortar preparation was also accomplished with the favourite mortars. The fresh mortar was filled into hollowed marble cylinders with an inside diameter of 3 cm. A roughly granulated and middle grained marble from the Market Gate of Milet were used as cylinders. The prepared cylinders were covered with plastic foil and stored 7 days in a climate 20/65. The contact of the fresh mortar with the marble showed a different water suction behaviour of the two marble types, which could be observed by the diverse darkening of the outside surfaces of the cylinders. The roughly granulated marble showed a faster suction than the middle grained marble. To define the change in colour, the marble cylinders were photographed before and 7 days after the experiment. Comparing these pictures, it becomes clear that the pure calcitic marble remains white and the middle grained dolomitic marble has assumed an easily sallow change in colour, independently from the used mixture. This colouring is caused by the still containing moist in the marble. A similar yellow colouring appears by wetting the dolomitic marble with distilled water. A smaller median pores radius (measured by using mercury intrusion porosimetry) of

the dolomitic results in a different water suction behaviour, i.e. the dolomitic marble dries much slower than the calcitic marble.

## **SUMMARY**

Mortars with a binder combination of pozzolana and white cement, well defined aggregates (quartz sand, limestone powder) and chemical additives were developed for the restoration of the Market Gate of Milet. The developed mortars are compatible to the marble and the steel. The change in colour of the dolomitic marble is reversible by drying and the  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content of the mortars are optimized to prevent steel corrosion. Furthermore the mortars have adapted physico-mechanical and chemical-mineralogical properties as well as an adapted white colour so that they are suitable for this dedicated restoration purpose.

## **BIBLIOGRAPHIC REFERENCES**

- DIN 1053-3. *Mauerwerk; Bewehrtes Mauerwerk; Berechnung und Ausführung*. Ausgabe: 1990-02.
- DIN 18555-2. *Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts*. Ausgabe:1982-09.
- DIN EN 1015-9. *Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 9: Bestimmung der Verarbeitbarkeitszeit und der Korrigierbarkeitszeit von Frischmörtel*. Ausgabe: 1999-10.
- DIN 1164, *Zement mit besonderen Eigenschaften - Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis*. Ausgabe:2000-11.
- KLEEN, E. *Zusatzmittel für Hochleistungsbetone*. Tiefbau, 7, p. 414, 1999.
- WILD, S., KHATIB, J.M. *Porlandite Consumption in Metakaolin Cement Pastes and Mortars*. Cement and Concrete Research, 27, p. 137-146, 1997.



## Anlage 12

The Market Gate of Milet of the Pergamon Museum  
Berlin - Deterioration Characteristics and Mortar  
Development for Restoration purposes.

Middendorf, B., Siegesmund, S., Maack, V., Müller, K.  
& Ruedrich, J.



# **THE MARKET GATE OF MILET OF THE PERGAMON MUSEUM BERLIN - DETERIORATION CHARACTERISTICS AND MORTAR DEVELOPMENT FOR RESTORATION PURPOSES**

Bernhard Middendorf\*

Dept. of Structural Materials, University Kassel, Moenchebergstr. 7, 34125 Kassel, Germany

Siegfried Siegesmund

Geoscience Centre, University of Göttingen, Goldschmidtstrasse 3, 37077 Göttingen, Germany

Verena Maack

Dept. of Structural Materials, University Kassel, Moenchebergstr. 7, 34125 Kassel, Germany

Kathrin Müller

Geoscience Centre, University of Göttingen, Goldschmidtstrasse 3, 37077 Göttingen, Germany

Joerg Ruedrich

Geoscience Centre, University of Göttingen, Goldschmidtstrasse 3, 37077 Göttingen, Germany

## **Abstract**

The indoor exhibit of the Market Gate of Milet is unique for an archaeological monument. The reconstruction of the gate was done in such a way that most marble fragments were removed leaving 3 - 4cm thick cored marble columns. These cored columns were mounted on a steel construction and filled with different mortars or filled with special shaped brick blocks combined with mortar. All missing marble elements were replaced by copies made of portland cement based building materials. On the one hand during World War II the monument was hardly damaged by aerial bombardment. On the other hand the Market Gate of Milet was exposed to weathering for two years, because a protecting brick wall was also destroyed. The observed deterioration phenomena are microcracks, macroscopic fractures, flaking, sugaring, graying, salt efflorescence, sinter and rust formation etc. The rapid deterioration seems to be due to indoor atmospheric effects and also to combination of incompatible materials (e.g. marble, steel, mortar, concretes, bricks etc.). Compatible building materials like mortars or stone replacing materials have to be developed for the planned restoration. The requirements for restoration mortars are chemical/mineralogical and physical/mechanical compatibilities with the existing building materials. In detail this means that the mortar should ensure good bonding properties, adapted strength development and in direct contact not stain the marble. The favourite mortar was developed with a hydraulic binder based on iron-free white cement and pozzolana based on activated clay. A special limestone / quartz sand mixture was used as aggregate. The cement was adjusted using chemical additives. Extensive and special designed tests were applied to prove the suitability of the developed mortar for the restoration of this precious monument.

**Keywords:** marble, mortar adaption

\*Author to whom correspondence should be addressed.

## 1 Introduction

The Market Gate of Milet was probably built in the twenties of the second century a. Chr. at the state market of the small Asian city Milet. After the Market Gate had been integrated into the late antique city wall during Byzantine time, an earthquake destroyed Milet and with it also the Market Gate. After the excavation of the gate 1903, parts of the gate were given to the Turkish authorities. 1925 over a reconstructed pedestal, the gate was rebuilt with the remaining original marble fragments in the Pergamon Museum Berlin (Figure 1a). The lacking parts were replaced with stone supplement cementitious based materials. In order to guarantee the constructive stability of the gate, the marble columns were hollowed by core drilling. Into the emerging cavity of the columns, a steel construction was integrated and was filled with mortar or was replenished partially with ceramic form stones.

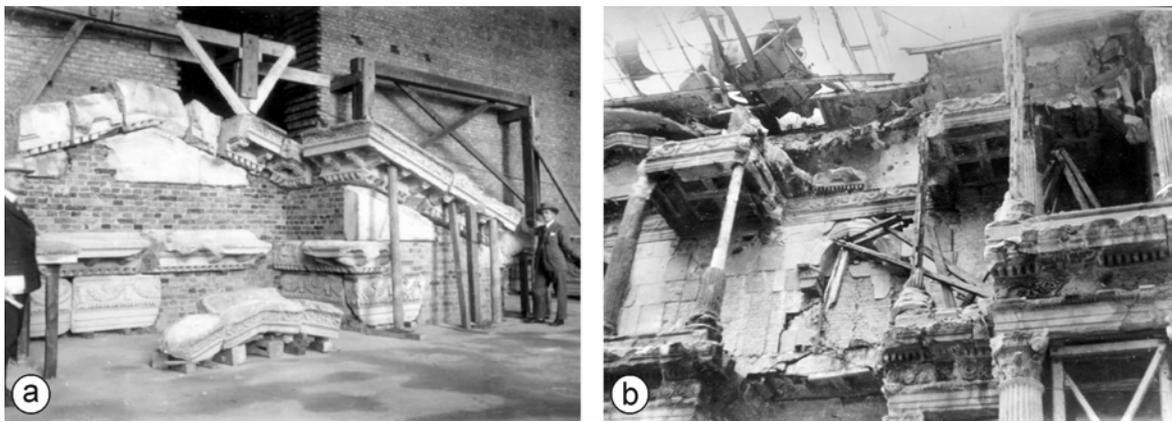


Figure 1: Photographs of the Market Gate of Milet show (a) the first steps of reconstruction around 1925 and (b) war damages after 1945 which partly laid open the steel construction (from Stročka 1981).

The pedestal and the ceiling consist of steel concrete constructions, which are covered with original marble fragments. During World War II the Market Gate was damaged (Figure 1b). The subsequent restoration took two years. However the damages like cracks and efflorescences became increasingly more serious in the meantime. Nowadays the Market Gate should be totally restored, which means it will be back-build and rebuild later on. Preinvestigations to characterize the building materials and the structural conditions are promoted by the German Environmental Association (DBU). One part of this project is the chemical-mineralogical and physico-mechanical characterisation of the used building materials with the aim to develop compatible restoration mortars for the rebuilding.

## 2 Recent construction properties

The investigations have been carried out on drilling cores, which are gained from several positions of the Market Gate. A core from a column (Fig. 2) will serve as an example for the discussion of the properties of the used materials for reconstruction. For further information about the assumed construction of the columns see also Ruedrich et al. (this volume).

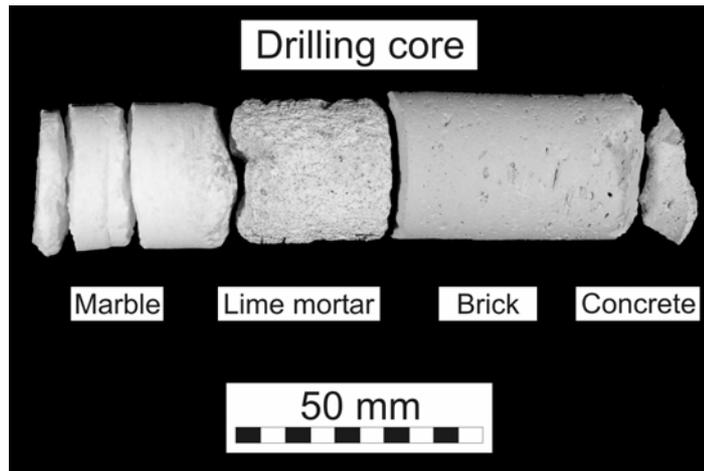


Figure 2: Drilling core of a column with typical material sequence of marble, lime mortar, brick and concrete.

The typical material sequence of the columns is a outer rim of marble, a grouting lime mortar, a casing of brick tube and a filling of concrete (Fig. 2). In the central part of the column a cross pillar of angle steel is inserted for static reasons. The marble, lime mortar, brick and concrete were characterised by quantitative chemical analysis (whole-rock geochemistry of major and trace elements via wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry, XRFS, s. Table 1). Also mineralogical and fabric analysis have been carried out by means of transmitted light microscopy and scanning electron microscopy (SEM). Furthermore, the porosity and the pore space distribution were measured by using mercury intrusion porosimetry (MIP).

Table 1: Results of whole-rock geochemistry of major and trace elements.

Material	SiO <sub>2</sub> [%]	TiO <sub>2</sub> [%]	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [%]	MnO [%]	MgO [%]	CaO [%]	Na <sub>2</sub> O [%]	K <sub>2</sub> O [%]	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> [%]	Total
Marble	7.60	0.02	0.20	0.12	0.00	0.24	51.50	0.08	<LLD	0.01	59.77
Lime mortar	66.30	0.02	2.30	0.68	0.01	1.08	16.79	0.31	0.52	0.04	88.05
Brick	56.40	0.66	10.90	4.44	0.07	2.39	11.56	0.81	2.92	0.13	90.28
Concrete	64.50	0.14	2.50	0.85	0.02	0.50	20.32	0.25	0.46	0.03	89.56

Material	Sc [ppm]	V [ppm]	Cr [ppm]	Co [ppm]	Ni [ppm]	Cu [ppm]	Zn [ppm]	Ga [ppm]	Rb [ppm]	Sr [ppm]	Zr [ppm]	Nb [ppm]	Ba [ppm]	Pb [ppm]	Y [ppm]
Marble	21	8	6	55	1	LLD	9	1	2	92	17	0	32	6	0
Lime mortar	8	20	13	3	8	35	12	3	17	183	62	3	131	9	6
Brick	22	86	72	22	35	25	67	15	108	322	218	15	427	35	25
Concrete	15	28	15	10	5	4	12	5	19	320	89	5	191	2	7

LLD lower limit of detection

Marble – The natural building stone is a nearly pure calcite-marble and shows a bright white colour. Microscopically, the marble exhibits a equigranular polygonal grain fabric

(Fig. 3a) with predominantly straight grain boundaries. Locally also  $120^\circ$  triple-point junctions are occurred. The average grain size is approximately  $800\ \mu\text{m}$ . The grain boundaries are opened in form of microcracks, which are represented in the pore spaces of the marble. The porosity is very low at about 0.5 Vol.-%. The quantitative chemical analysis of the marble show a relatively high content of silica (cf. Table 1).

**Lime mortar** – The lime mortar is of bright grey to light red colour. It represents a highly porous material (38 Vol.-%) with predominantly capillary pores. The aggregate is dominated by quartz grains in the range of middle sand. The quartz grains mostly exhibit rounded grain shapes. Fig. 3b shows the typical structure of the sampled material. The very fine grained adhesive agent mainly exists of lime, but it is only subtotal transformed in carbonate phases. However, the hydraulic content of the mortar is only slight.

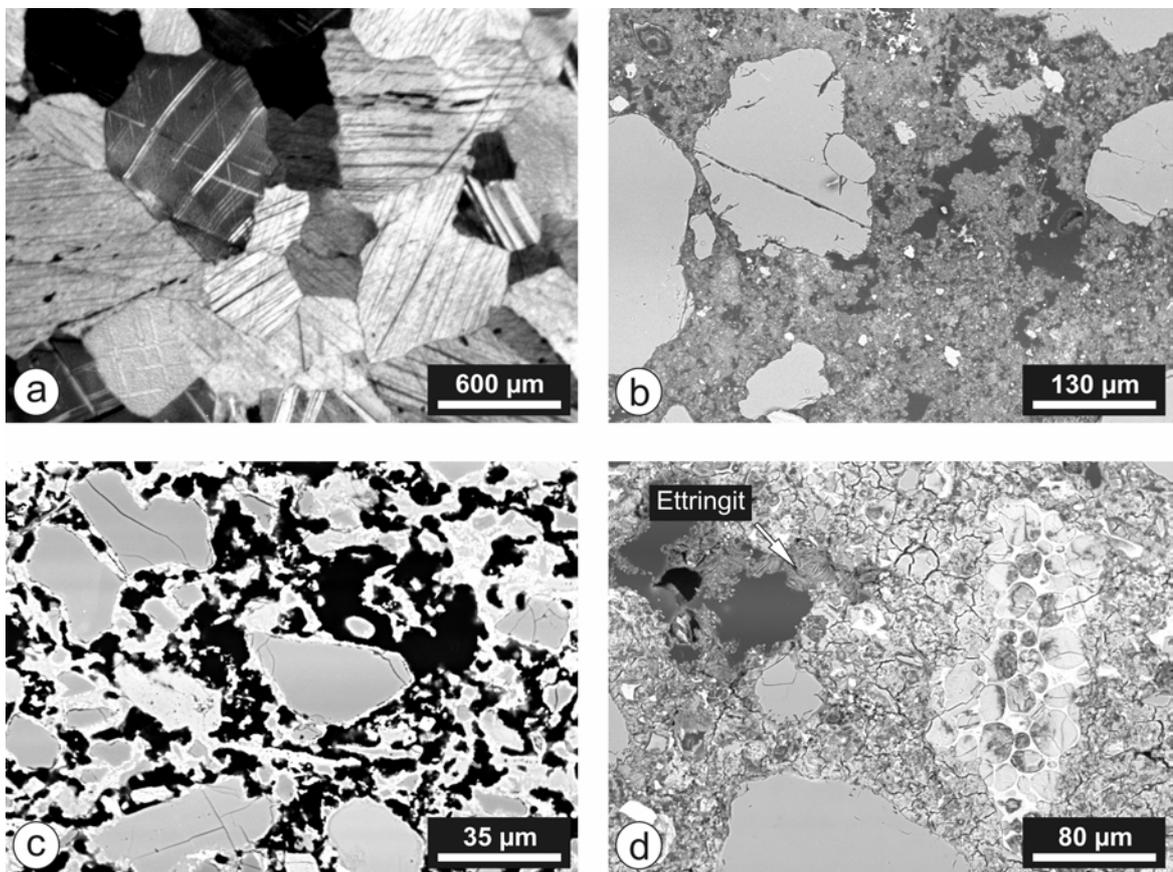


Figure 3: (a) Photomicrographs of the original marble (crossed polarizers) and SEM images of the different materials of the Market Gate of Milet used for reconstruction: (b) lime mortar, (c) brick and (d) concrete.

**Brick** – The brick is macroscopically characterized by a light red colour, which is evident for a low temperature burning. The porosity is very high at about 45 Vol.-%, whereas the pore size is mainly in the range of capillary pores. The aggregate is dominated by mostly angular quartz grains with a average grain size in the range of fine sand. The matrix exists predominantly of diopside, anorthite and albite, which are reaction products of the burning. Small rims around the quartz grains can be seen in SEM-images of the matrix. Measurements of XRFS show a relatively high content of CaO (11.56 %, see

Table 1) for the matrix. It is evident, that the mass of carbonate originated from the basic material.

Concrete – The concrete was made of a coarse grained portland cement (OPC) and shows macroscopically a light grey colour. It has a porosity of about 18.5 Vol.-% with a high content of capillary pores. The aggregate is dominated by round quartz grains in the range of middle sand. Non reacted clinker minerals like belite ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ) and alite ( $\text{Ca}_3\text{SiO}_5$ ) can be seen in the binder matrix. In the pores delayed ettringite ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2[(\text{OH})_4(\text{SO}_4)]_3 \times 24 \text{H}_2\text{O}$ ) formation was observed.

### 3 Adaption of restoration mortar

A dedicated physico-mechanical and chemical-mineralogical adaptation of a restoration mortar to the stone minimizes damages. Strength and elasticity of the mortars must be adapted to the marble otherwise disturbances at the marble/mortar zone are pre-programmed. Furthermore, the shrinking should be minimized in order to guarantee a well interlocking. The  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content should be as low as possible to prevent a decolouration of the marble and to minimize efflorescences. But a minimum of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  had to exist to protect the steel from corrosion. The mortar should be self compacting to relief the structure in the columns. For the reduction of loads, the density should be as low as possible. The mortar should not be inclined to bleeding, because a penetration of the pore solution can result changes in the colour of marble or in marble structure, e.g. an extension between the grain-grain-zones. Therefore a dedicated binder/aggregate mixture including chemical additives (Kleen 1999) was developed.

The following materials with the named qualities and effects were used:

- white cement, type CEM I 52,5, acc. EN 196  
normal strength development  
normal hydration heat  
high fineness  
white colour
- calcinated clay to reduce  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content  
high pozzolanic reactivity  
low density  
high fineness  
white colour
- quartz sand as coarse aggregate  
high chemical purity  
high mechanical solidity  
well fitting grain size distribution
- limestone powder as an inert Filler  
high purity  
high whiting rate  
well fitting grain size distribution
- plasticizer as a chemical additive to reduce water content  
colourlessness
- air entrainer as a chemical additive to reduce mortar density  
adding air voids

### Mortar composition

The mortars were produced by using different binder/aggregate ratios of 1/2, 1/3 and 1/4 and by adding a calcinated clay content of 20 or 30 wt.-% (Wild & Khatib 1997; He & Makovichy 1995; Takemoto & Uchikawa 1980; Shi & Day 2000; Liebig, 1997). The limestone powder / quartz sand ratio was 2/3. From each mixture, one mortar was composed with plasticizer, one with plasticizer and air entrainer and one without chemical additives.

### Results of the fresh mortar determinations

All mortars were adjusted to an uniform spreading capacity (acc. DIN EN 1053-3) of 24-25 cm in order to guarantee self-compaction effects. The mortars were composed with a minimum water content by using plasticizer and air entrainer. The maximum water/binder ratio was 0.48. The air pore content (acc. DIN 18555-2) of the mortars with plasticizers was at about 3 vol.-%, for mortars without additives less than 1 vol.-%. The air pore content of the combined mixtures with plasticizer and air entrainer differed strongly in a range of 10 – 22 vol.-%, because of the incompatibility of these additives. The shortest workability time (acc. DIN EN 1015-9) amounts to 20 min (mortars with plasticizer) and can be attributed to the short effectiveness of the plasticizer on the basis of melamine sulphonate. An filling in and processing of the mortar can hardly be done in this time, further investigations are necessary.

### Results of the hardened mortar determinations

Efflorescences were not found on any of the examined mortars after watering cycles. The mercury intrusion porosimetry supports the supposition of the incompatibility of plasticizer with the air entrainer, because multiplied number of undesired capillary pores were formed by the combined use of both. The mortars with a binder/sand ratio of 1/4 and plasticizer (M1:4 F) showed the lowest shrinking of about 0,9 ‰ after 28 days (Table 2). The mortars do not shrink much; no shrinkage cracks could be detected in the mortar specimens as well as on the contact zone of mortar/marble samples.

As another criterion for the selection of suitable mixtures, the compressive strength should be adapted to the marble which has a compressive strength of around 60 N/mm<sup>2</sup>.

Table 2: compressive strength and shrinkage of selected mortars.

Mortar mixtures	Comp. strength 28 days [N/mm <sup>2</sup> ]	Shrinking 28 days [‰]
M 1:4 F with 20 wt. -% calcinated clay	50.6	0.86
M 1:4 F with 30 wt.-. -% calcinated clay	52.8	0.93

In the favourite mixtures low Ca(OH)<sub>2</sub>-contents of 1.2 to 2.7 wt.-% were measured which are results of the low cement and high calcinated clay content. Carbonatisation tests by using an alcoholic phenolphthaleine solution have shown, that the mortars have a sufficient pH-value to protect the steel which will be used to reinforce the structure.

### Compatibility marble / mortar

Aim of this determination was the recognition of possible changes in colour of the marble caused by pore solution of the mortar. In order to be able to clarify this question, the production of thin sections with original marble embedded in binder matrix were necessary. For the preparation of the samples for compatibility measurements the original marble was carefully grained into small pieces with a grain-size of 2–4 mm by using a pincers. Only pure white grains were used. The marble binder mixtures are produced with

a binder / marble ratio of 1/2. Because of the high cement and the relatively low content of calcinated clay (20 wt.-%) this mixture had the highest  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content.

For the production of the specimens, prisms  $4*4*16 \text{ cm}^3$  were prepared acc. DIN 1164-7. Two days after the preparation, the marble mortar prisms were divided into three parts. One part was stored in the climate with a temperature of  $20^\circ\text{C}$  and a relative humidity of 65 % (20/65) The second part was stored in a saturated  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  solution and the third part was stored into distilled water. After 28 days storage thin sections were prepared from the thin cut samples. By using different microscopic techniques (optical and petrographic microscope) the changes in colour and structure were determined. Neither changes in colour nor other decompositions of the marble could be detected.

An examination of the compatibility of the marble with the used additives for the mortar preparation was also accomplished with the favourite mortars. The fresh mortar was filled into hollowed marble cylinders with an inside diameter of 3 cm. A roughly granulated and middle grained marble from the Market Gate of Milet were used as cylinders. The prepared cylinders were covered with plastic foil and stored 7 days in a climate 20/65. The contact of the fresh mortar with the marble showed a different water suction behaviour of the two marble types, which could be observed by the diverse darkening of the outside surfaces of the cylinders. The roughly granulated marble showed a faster suction than the middle grained marble. To define the change in colour, the marble cylinders were photographed before and 7 days after the experiment. Comparing these pictures, it becomes clear that the pure calcitic marble remains a white colour, independently from the used mortar mixture.

## **5 Conclusions**

The material sequence of the columns of the Market Gate of Milet is an outer rim of marble, a grouting lime based mortar, formed ceramic bricks and a filling of concrete. In the centre of the columns a cross pillar of angle steel is inserted for static reasons. These building materials -excluding the steel- were characterised by using physico-mechanical and chemical-mineralogical methods with the aim to get characteristic data which are essential for the developing of compatible restoration mortars for the rebuilding of the Market Gate of Milet.

Mortars with a binder combination of white cement and pozzolana, well defined aggregates (quartz sand, limestone powder) and chemical additives were developed for the restoration of the Market Gate of Milet. The mortars have adapted physico-mechanical and chemical-mineralogical properties as well as an adapted white colour. The initial change in colour of the marble is reversible by drying and the adjusted  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  content of the mortars are optimized to prevent steel corrosion. Furthermore the mortars are self compacting because of the optimized grain size distribution. The use of an air entrainer ensures a density reduction which was necessary to reduce the load of the columns. Also the mortars have had a good workability and could be applied over a period of one hour.

## **6 Acknowledgements**

We are grateful to V. Kästner from the Staatliche Museen zu Berlin - Preußischer Kulturbesitz for his help by the investigations. Our work was supported by the Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

## 7 References

- Bundesanstalt der deutschen Kalkindustrie e.V., 1987. Prüfverfahren Arbeitsvorschrift zur Bestimmung des ungebundenen CaO-Anteils ( nach Gehrke); Arbeitsblatt 13.
- DIN 1053-3. Mauerwerk; Bewehrtes Mauerwerk; Berechnung und Ausführung. Ausgabe: 1990-02.
- DIN 1164, Zement mit besonderen Eigenschaften - Zusammensetzung, Anforderungen, Übereinstimmungsnachweis. Ausgabe:2000-11.
- DIN 18555-2. Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln; Frischmörtel mit dichten Zuschlägen; Bestimmung der Konsistenz, der Rohdichte und des Luftgehalts. Ausgabe:1982-09.
- DIN EN 1015-9. Prüfverfahren für Mörtel für Mauerwerk - Teil 9: Bestimmung der Verarbeitbarkeitszeit und der Korrigierbarkeitszeit von Frischmörtel. Ausgabe: 1999-10.
- He, Ch.,B., and Makovichy, E., 1995. Pozzolanic reactions of six principal clay minerals: Activation, reactivity assessments and technological effects, Cement and Concrete Research, Vol.25, No.8, pp.1691-1702.
- Kleen, E., 1999. Zusatzmittel für Hochleistungsbetone. Tiefbau, 7, p. 414.
- Liebig, E., 1997. Gebrannte Tonminerale und Trassmehle als puzzolanische Komponenten in Kalkmörteln, PhD-Thesis, University Karlsruhe, Germany.
- Ruedrich, J., Just, A., Jacobs, F., Hertrich, M., Yaramanci, U. & Siegesmund, S., this volume. Construction physics of the Market Gate of Milet discovered by non-destructive tools.
- Shi, C. & Day, R.L., 2000. Pozzolanic reaction in the presence of the chemical activators, Part 1. Reaction kinetics, Cement and Concrete Research, V.30, pp.51-58.
- Strocka, V.M., 1981. „Das Markttor von Milet“, 128. Winkelmannsprogramm der Archäologischen Gesellschaft zu Berlin, Verlag Walter de Gruyter & CO., Berlin.
- Takemoto, K. & Uchikawa H. 1980. Hydration of pozzolanic cements, Proc. 7<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement, pp. IV-2/1-29, Paris.
- Wild, S., Khatib, J.M., 1997. Porlandite Consumption in Metakaolin Cement Pastes and Mortars. Cement and Concrete Research, 27, p. 137-146.

## Anlage 13

### Das Markttor von Milet: Schadensbilder, Materialcharakteristika und Entwicklung von Restauriermörtel.

Siegesmund, S., Middendorf, B., Maack, V. & Rüdlich,  
J., (Vorabdruck)



# **DAS MARKTTOR VON MILET: SCHADENSBILDER, MATERIALCHARAKTERISTIKA UND ENTWICKLUNG VON RESTAURIERMÖRTEL**

Siegesmund, S.<sup>1</sup>, Middendorf, B.<sup>2</sup>, Maack, V.<sup>2</sup>, Rüdrieh, J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Geowissenschaftliches Zentrum der Universität Göttingen

<sup>2</sup>Universität Kassel, Werkstoffe des Bauwesens

## **BAUGESCHICHTE**

Das Markttor von Milet stellt ein nahezu einzigartiges archäologisches Baudenkmal nördlich der Alpen dar. Es handelt sich um eines der größten, zusammenhängenden Monumente, die im musealen Innenraum zu bewundern sind. Damit trägt das Markttor zu einem historisch einmaligen Ensemble bei und hat seinerseits, wie auch der namensgebende Pergamonaltar oder das Wüstenschloss von Mschatta, die Architektur des Pergamonmuseums in Berlin selbst beeinflusst.

Seit 1999 wurde das mit dem Markttor von Milet assoziierte Pergamonmuseum/Museumsinsel seitens des UNESCO – „World Heritage Funds“ in die Liste des besonders erhaltungswürdigen Weltkulturerbes aufgenommen. Die Architekturfragmente und Trümmer der zweistöckigen Markttorfassade wurden 1903 bei deutschen Grabungen in der Stadt Milet unter Leitung des Archäologen T. Wiegand geborgen und konnten nach Fundteilung mit den türkischen Behörden 1907 - 1908 nach Berlin überführt werden. In den Jahren 1925 - 1929 wurde das Tor bestehend aus insgesamt 750 t Marmorfragmenten nach Vorgaben des Architekten H. Knackfuß und unter Leitung des Archäologen W. von Massow im neuen, nach dem I. Weltkrieg eigens erweiterten Pergamonmuseum rekonstruiert und wieder aufgebaut (s. Abb. 1)(Strocka, 1981).

## **RESTAURIERUNGSGESCHICHTE**

Im Zuge der Aufbaumaßnahmen in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts wurden aus statischen Gründen alle Säulenschäfte, Kapitelle und Gebälke bis auf eine geringmächtige Außenhaut ausgebohrt und im Inneren mit durchlaufenden Stahlstützen versehen (Abb. 2a, b), sowie mit Ersatzmaterialien ausgefüllt (Strocka, 1981). Die Kassettendecken sind zum Teil in eine durchgehende Stahlbetonkonstruktion eingehängt und zum größeren Teil komplett aus Beton ergänzt. Neben den Originalteilen aus Marmor wurden Baumaterialien wie Gips, mineralische Ergänzungs- und Fugenmörtel aber auch Ziegel (s. Abb. 3a) als Baumaterial verwendet.

Während des zweiten Weltkrieges wurde das Tor durch einen Luftminentreffer trotz Schutzummauerung schwer beschädigt. Die Explosion zerstörte das Dach und das Oberlicht über dem Markttor, ließ durch die Wucht den rechten Flügel des Tores überwiegend einstürzen und verursachte Brandschäden (s. Abb. 3b). Weitere Schäden entstanden durch umherfliegende Schrapnell und Splitter, die in Form von Abplatzungen und Einschlagkratern

an vielen Stellen des Baukörpers zu beobachten sind. Erst nachdem bereits ein Winter vergangen war, konnte das Tor durch ein Notdach vor der freien Bewitterung geschützt werden. Umfangreiche Restaurierungsmaßnahmen, die 1952 - 1954 unter archäologischer Leitung von H.H. Völker durchgeführt wurden, versetzten das Bauwerk in den heutigen Zustand. Auch hier ist keine ausreichende Dokumentation der Maßnahmen überliefert. Es können nach Aktenlage keinerlei Aussagen über den Umfang, Art und die Qualität der Ausbesserungsarbeiten und der verarbeiteten Materialien gemacht werden.

In den letzten Jahren mussten vom Museumspersonal immer wieder spontan abgegangene Fragmente geborgen werden. Infolge dessen wurde zum Schutz von BesucherInnen ein Steinschlagnetz über die gesamte Front des Tores angebracht.

## SCHADENSKARTIERUNG

Für eine Schadenskartierung wurde eine repräsentative Kartierachse ausgewählt. Folgende Schäden wurden unterschieden: Risse und Rissysteme, Metallkorrosionen, konstruktionsbedingte Schäden, Verschmutzungen, Sinterschichten, Krusten, Mörtelschleier, Marmorabzuckerungen, mineralische Klebungen, Verfärbungen, defekte Fugen, Schalenbildungen, Gefügauflockerungen etc. (Abb. 4). Die wichtigste Beobachtung der Materialverteilungskartierung ist, dass auf Oberflächen des Originalmarmors unterschieden werden kann zwischen solchen mit antiken Oberflächenbearbeitungen und Varietäten, wo diese z.T. völlig fehlen. D.h. von der Antike bis in die Gegenwart sind massive Oberflächenverluste aufgetreten sind. Auch wenn weite Bereiche des Marktttores noch aus Originalmarmor bestehen, weist eben nur noch ein wesentlich geringerer Teil Originaloberflächen auf.

Die nach Aktenlage wichtigsten Aufbau- und Restaurierungsphasen des Marktttores aus der Berliner Zeit werden durch die Ergebnisse der Materialkartierung detailliert aufgelöst und deutlicher rekonstruierbar. So konnte in der ersten Aufbauphase in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts ein qualitativ hochwertiger Restauriermörtel zugeordnet werden. Er besteht makroskopisch aus u.a. einem feinen, weiß-milchigen, kristallinen Zuschlag, bei dem es sich vermutlich um Marmor handelt. Sollte sich diese Vermutung bestätigen, so liegt der Verdacht nahe, dass das Marmorermehl bei den Ausbohrarbeiten anfiel und gleich weiterverarbeitet wurde. Da dieser Restauriermörtel vergleichsweise geringe Schädigungen aufweist, scheint die Ermittlung seiner gesteintechnischen Kennwerte vor dem Hintergrund späterer Restaurierungsmaßnahmen dringlich. In diesen Zeitraum kam ein ebenfalls qualitativ guter Kalkfugenmörtel zum Einsatz. Weiterhin wurden einige am Tor fehlende Kapitelle komplett durch, sich am Original orientierende Gipsabgüsse ergänzt. Der Nachkriegszeit wurden in deutlicher Abgrenzung zu o. g. Materialien im Fugen- und Restauriermörtelbereich im Verhältnis qualitativ einfach aufgebaute Zementmörtel zugeordnet. Auch die schlechte Ausführung der Antragsungen unterscheidet sich im Vergleich zu denen der früheren Restaurierungsphase deutlich. So wurde beispielsweise weitflächig in die angrenzenden Originalflächen Zementmörtel angetragen.

In mehreren Bereichen des Markttors, vor allem unterhalb des oberen Gurtgesimses und im Bereich der oberen Kapitelle und Säulen zeigen sich tuffartige Sinterablagerungen. Die Sinterschichten sind auf der verwitterten Steinoberfläche aufgewachsen. Auffallend ist, dass die Sinterschichten fahnenartig unterhalb feiner Haarrisse auftreten. Aufgrund der Ausprägung und Morphologie der Ablagerungen kann davon ausgegangen werden, dass es sich um Auswaschungen von Bindemitteln handelt. Die Sinterbildungen weisen auf eine erhöhte Feuchteeinwirkung hin, die vermutlich auch eine Korrosion der Stahlbewehrung verursachte.

Das Markttor weist deutliche strukturelle Schäden auf, die vermutlich auf Verformungen zurückzuführen sind, wie z.B. Risse in den Verbindungen Betonplatten/Marmorverkleidungen (Abb.3) sowie an den Säulenhäupten auf den Stahlbetonplatten (Abb. 5) und möglicherweise durch außermittigen Druck hervorgerufene Abplatzungen an einigen Säulen (Abb. 5). Verformungsmessungen über die Risse in einem Zeitraum von 6 Monaten durch die Arbeitsgruppe der Universität Kassel lassen erkennen, dass die Maximalverformungen über den Rissen im Bereich von 0,21mm/m liegen (Schmidt & Middendorf, 2002). Bei einem direkten Vergleich von Objekt- und Raumtemperatur als auch den Verformungsmessungen zeigt sich, dass an den Rissen eine temperaturabhängige Verformung erkennbar ist. Jedoch führten Erschütterungsmessungen an einer Fußgängerüberführung am Gebäude des Pergamonmuseums zu keiner messbaren Verformung des Markttors.

Wie in Abb. 5 eindrucksvoll zu erkennen ist, treten an statisch markanten Stellen wie z.B. an den in die Rückwand greifenden Gebälken massive, umlaufende bis zu mehreren Zentimetern mächtige Risse auf. Flächig nach unten orientierte Mörtelschleier sind an Rissysteme v.a. im Gebälk und an die Säulen gekoppelt. Durch Dübel und mineralische Mörtel fixierte Originalmarmorbruchstücke werden z.T. nur noch durch Verspannung gehalten. Starke Gefügeschäden treten an den reich verzierten Ornamenten des Gebälkes, den Kapitellen sowie an den Kannelurenstegen der Säulen auf (Abb. 5). Hier tritt ein Massenverlust durch „Abzuckern“ der oberen Kornlagen auf. Am gesamten Markttor sind rostende Eisenteile zu beobachten, welche bereits Schäden wie Rostsprengung und Verfärbung durch Rostläufer verursacht haben (Abb. 5).

Krusten- und Patinabildungen oder andere potentielle Schadwirkungen gehen auch von Organismen aus, die anorganische oder organische Säuren produzieren (Abb. 5). Während der Anteil der bakteriellen koloniebildenden Einheiten (CFU) in der Raumluft nur 3-4% betrug, wurden in Abdrücken von der Oberfläche des Gesteinsmaterials ca. 40% pilzliche CFU gefunden, außer auf stark staubbelasteten Oberflächen, wo der Anteil pilzlicher CFU bei ca. 20% lag (Hoppert, 2002). Insgesamt lässt sich feststellen, dass sich unter der kontrollierten Atmosphäre eines Innenraumes Biofilme sehr langsam entwickeln, solange die Oberflächen nicht durchfeuchtet sind. Im Falle des Markttors von Milet wird die Gesteinsoberfläche des Bauwerkes durch den Film in zweifacher Hinsicht beeinträchtigt: a) Pigmentierung der Oberfläche und b) Herauslösen oberflächenparalleler Partikel. Der Umfang der Schadenswirkungen betrifft nur die Oberfläche bis in eine Tiefe von maximal 100 µm.

Es ist eine deutliche Schadenskonzentration an signifikanten Stellen mit ehemals deutlich erhöhter Feuchtebelastung zu beobachten. Die Schadenskartierung gibt eine räumliche Verbreitung der in der Musterfläche vorkommenden Phänomene wieder. Antike Marmore, Mörtel, Marmorimitate, Gipsabgüsse, Marmorplatten, Zementabgüsse, Eisenarmierungen, Eisenanker und Stahlklammern konnten den jeweiligen Aufbau- und Restaurierungsphasen zugeordnet werden. Besonders auffällig ist, dass der mehrschichtige Marmorimitatmörtel der 20er Jahre über deutlich weniger Schäden wie Abplatzungen, Schalenbildungen und Ausbrüche verfügt. Dies steht im Gegensatz zu den Restaurierungsphasen der 50er Jahre. Zukünftige Arbeiten werden die gewonnenen Erkenntnisse über die gesamte Fläche des Objektes ausdehnen müssen. Es ist jedoch zu diesem Zeitpunkt schon deutlich geworden, dass das Markttor von Milet ein massives, multiples Schadensbild aufweist, welches einen zügigen Handlungsbedarf erforderlich macht.

## DAS RAUMKLIMA

Die Verwitterung von Baumaterialien wird zu einem großen Teil durch die Umweltbedingungen, denen sie ausgesetzt sind, gesteuert. Viele der beobachteten Schäden am Markttor sind zumindest mittelbar an Klima-Variationen (Temperatur, relative Feuchte, Taupunktunterschreitungen etc.) gekoppelt. Es muss demnach untersucht werden, ob und inwieweit die derzeitigen Innenraum-Umweltbedingungen die fortschreitende Degradation des Objektes begünstigen. Nicht unerheblich ist der möglicherweise anthropogene Belastungspfad, der vor dem Hintergrund von durchschnittlich 6.000 (!) BesucherInnen am Tag (mit Spitzenwerten um 20.000 Personen/Tag) erheblich die Komposition der Innenraum-atmosphäre beeinflussen dürfte.

Um einen Eindruck über die gesamte mikrobielle Belastung der Raumluft im unmittelbaren Umfeld des Markttores zu gewinnen, wurden Keimzahlen in der Raumluft und auf der Objektoberfläche bestimmt (Hoppert, 2002). Die Zahl der bakteriellen koloniebildenden Einheiten variiert zwischen 700 (in 3 und 1,5 m Höhe) und 2800 (in 30 cm Höhe) pro m<sup>3</sup> Raumluft. Damit liegt der Anteil bakterieller Organismen etwa 5-fach höher als für Gebäude vergleichbarer Größe. Der hohe Anteil bakterieller Organismen in der Raumluft lässt allerdings auf eine Situation schließen, in der sich gerade Bakterien (gegenüber Pilzen) leicht vermehren, z.B. eine durch Klimatisierung, viel Publikumsverkehr oder äußere Witterungsbedingungen bedingte hohe Luftfeuchtigkeit. Da Luftkeime und Sporen in der Regel an (größere) Staubpartikel adsorbiert sind, ist die Keimzahl auch immer ein direkter Ausdruck für die Gesamtlast an Aerosolen in der Raumluft.

Zu der Wechselwirkung BesucherInnen versus Ausstellungsobjekt gibt es in der einschlägigen Literatur noch keine ausreichenden Daten. Ein weiterer Faktor, der die besondere klimatische Situation im Innenraumbereich kontrolliert, sind die in den Museumswänden des Pergamonmuseums integrierten, defekten Belüftungskanäle, die mit Schuttresten aus dem 2. Weltkrieg verfüllt sind. Ihre Funktionsfähigkeit dürfte folglich stark herabgesetzt oder inaktiv sein. Zudem hat sich das ehemals aus Milchglas bestehende weiß getünchte Glasdach mit der Zeit verdunkelt und bewirkt so bei direkter Sonnenbestrahlung eine zusätzliche Aufheizung. Aus verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen ist

bekannt, dass gerade der Marmor sehr sensitiv auf steigende Temperaturen und variierende Feuchten reagiert (Siegesmund et al. 2000). Da im Pergamonmuseum bisher keine längerfristigen, detaillierten Innenraum-Klimadaten erhoben wurden, besteht vor dem Hintergrund der Beurteilung von wirksamen Kapillarkräften und Mobilisation etwaiger im Mauerwerk enthaltener Salze starker Handlungsbedarf. Zudem bildet dieser Datenpool die Basisdaten für Materialverträglichkeitsprüfungen. Damit Klimamessungen überhaupt einen reproduzierbaren Aussagewert besitzen, muss die Dauer der Messungen alle zu erwartenden, extremen Klimazustände, wie Jahreszeiten, SpitzenbesucherInnenströme etc. umfassen. Um die Auswirkungen des Innenraumklimas auf den Objektkörper möglichst hochauflösend beobachten zu können, wurden Messfühler jeweils direkt am Objekt, unter der Decke des Museumsdaches, am Boden und im Bereich des größten Luftzuges angebracht. Zu Vergleichszwecken wurden die Temperatur- und Feuchtigkeitsverläufe der Außenluft gemessen, um die Kopplung des Innenklimas mit dem Außenklima beurteilen zu können (Abb. 6). Die Messungen fanden im Zeitraum vom 11.04.2002 bis zum 20.11.2003 statt.

Zur Darstellung eines Jahresklimazyklus wurden die erfassten 15-Minuten-Werte reduziert, indem 60-Minuten-Minima und -Maxima sowie Standardabweichungen berechnet wurden. Für die im Museum gemessenen Raumtemperaturen bestehen jahreszeitliche Temperaturschwankungen von insgesamt ca.  $10^{\circ}\text{C}$ , wobei Spitzenwerte von max.  $30^{\circ}\text{C}$  (Sommer) registriert wurden. In Abb. 6 ist zu erkennen, dass die Innentemperatur des Museums hauptsächlich von der Außentemperatur abhängt. Teilweise reagiert die Innentemperatur etwas zeitverzögert (wenige Tage) zu der Außentemperatur. Die Besucher scheinen keinen oder wenig Einfluss auf die Temperatur im Museum zu haben. Um dieses genauer zu überprüfen, wurden die Innentemperaturen gegen die Außentemperaturen von 10 - 18 Uhr (Öffnungszeit) jeweils für Besuchstage und Ruhetage (montags) aufgetragen. Würde ein Einfluss auf die Innentemperatur in Abhängigkeit von den Besuchern existieren, so müsste die Innentemperatur bei einer definierten Außentemperatur an Besuchertagen größer sein als an den Ruhetagen. Der direkte Vergleich z.B. bei einer Außentemperatur von  $10^{\circ}\text{C}$  ergibt Temperaturen von  $20 - 27^{\circ}\text{C}$ . Auch bei einer Außentemperatur von  $30^{\circ}\text{C}$  sind bei beiden Diagrammen die Innentemperaturen relativ gleich. Die Schlussfolgerung daraus ist, dass die Temperatur im Museum hauptsächlich von der Außentemperatur gesteuert wird. Die Besucher haben keinen oder nur einen geringen Einfluss auf die Innentemperatur.

Die Luftfeuchtigkeit könnte im System Naturstein/Mörtel ebenfalls von kritischer Bedeutung sein. Die Luftfeuchtigkeit gemessen im Innenbereich und im Außenbereich aufgetragen gegen die Besucherzahlen und gegen die Zeit ergibt keinen Zusammenhang. Die Analyse der Luftfeuchtigkeit im Museum in einem bestimmten Temperaturbereich gegen die Besucherzahlen aufgetragen zeigt keinen Zusammenhang. Bei Betrachtung der Daten im Einzelnen ist klar zu erkennen, dass die Luftfeuchtigkeit bei Besucherzahlen von 6.000 pro Tag eine vergleichbare Spannbreite wie an Ruhetagen aufweist. Eine Abhängigkeit zwischen der Anzahl der Besucher und den Schwankungen der Luftfeuchtigkeit ist somit nicht festzustellen.

## DER MARMOR

Für eine objektangepasste Sanierung der Marmore ist die Kenntnis des Erhaltungszustandes aber auch der mineralogischen Zusammensetzung und der Gefügeausprägung von entscheidender Bedeutung. Da bekannt war, dass unterschiedliche Marmore am Markttor verbaut sind, stellte sich die Frage, wie viele unterschiedliche Marmortypen Verwendung fanden und wie sich ihre Verteilung am Objekt darstellt. Zu diesem Zweck wurde eine Kartierung durchgeführt. Mittels gefügekundlicher Untersuchungsmethoden wurden zunächst im Keller des Pergamon Museums gelagerte Reststücke und Säulenbohrkerne analysiert. Auf der Basis der so gewonnenen Erkenntnisse erfolgte eine grundlegende Untergliederung der Marmortypen. Anhand der makroskopischen Beobachtungen wie Foliation, Riss- und Mineralisationsgefüge sowie Korngrößen konnten zwei grundlegend unterschiedliche Marmortypen gegeneinander abgegrenzt werden. Hierbei handelt es sich um einen vorwiegend undifferenzierten und einen unregelmäßig gebänderten Marmor. Für die Verteilung der beiden charakterisierten Marmortypen ist keine generelle Anordnung am Bauwerk zu erkennen, die auf eine stilistische Verwendung, auf Bauabschnitte des Gebäudes oder auf eine variierende Verfügbarkeiten der unterschiedlichen Marmore aufgrund von Abbauphasen im Steinbruch zurückzuführen ist (s. Abb. 7). Es können jedoch folgende Auffälligkeiten festgestellt werden:

- Häufiges Auftreten des gebänderten Marmortyps in den Giebelbereichen
- Säulenschäfte der oberen Ordnung werden generell vom vorwiegend undifferenzierten Marmortyp gebildet
- Säulenkapitelle werden generell vom vorwiegend undifferenzierten Marmortyp gebildet
- Säulenbasen werden generell vom vorwiegend undifferenzierten Marmortyp gebildet

Hingegen weisen die Säulenschäfte der unteren Ordnung eine sehr heterogene Verteilung der Marmortypen auf. Dies gilt ebenfalls für den Architrav und die Friese, wobei hier der vorwiegend undifferenzierte Marmortyp dominiert. Die Dominanz des vorwiegend undifferenzierten Marmortyps kann für das gesamte Markttor von Milet festgestellt werden.

## DAS MAKROGEFÜGE

Der vorwiegend undifferenzierte Marmor weist eine grauweiße Farbe auf. Am Objekt ist diese aufgrund einer stark ausgebildeten Patina bzw. eines Schmutzbelages nur selten zu erkennen. Vereinzelt zeigt dieser Marmortyp dunkelgraue Bänder, welche isoliert vorkommen und die Foliation nachzeichnen (s. Abb. 8a). Die Bänder verlaufen generell geradlinig und sind streng begrenzt. Sie erreichen Mächtigkeiten von zumeist 3 cm. Die makroskopisch zu eruiierende mittlere Korngröße liegt vorwiegend im Bereich zwischen 1,0 mm bis 1,5 mm, womit dieser Marmor als mittelkörnig zu beschreiben ist. Zusätzlich können verschiedene, nur lokal verbreitete Gefügemerkmale einer postmetamorphen Überprägung beobachtet werden.

Weitaus häufigstes Merkmal sind dabei mineralisierte Risse, welche durch feinstkörnige; hellrote Mineralisate verfüllt sind. Die Rissweiten liegen im Bereich von einigen Millimetern. Die Häufigkeit der Risse und ihre räumliche Lage sind insbesondere für die physikalischen

und mechanischen Eigenschaften des Gesteins von großer Bedeutsamkeit. Dies beruht darauf, dass auch mineralisierte Risse Schwachstellen im Gestein darstellen, die bei Beanspruchung aktiviert werden können. Neben den Rissen können auch mineralisierte Nester beobachtet werden, die zumeist taschenförmige Geometrie besitzen und scharfe Begrenzungen zum umgebenden Marmor aufweisen. Sie zeigen mit feinstkörnigen; rötlichen Verwachsungen die gleichen Mineralfüllungen wie die mineralisierten Risse. Die Ausdehnung der Mineralnester befindet sich im Zentimeter- bis Dezimeter-Bereich.

Der unregelmäßig gebänderte Marmor repräsentiert ein stark strukturiertes Gestein und ist durch einen ausgeprägten Lagenbau gekennzeichnet (s. Abb. 8b). Der Marmor weist makroskopisch ein weißes bis weißgraues Erscheinungsbild auf. Wesentliches Gefügemerkmal ist eine deutliche Bänderung (Lager), welche die Foliation nachzeichnet. Hierbei können zwei unterschiedliche Arten von Materialwechselln beobachtet werden. Zum einen handelt es sich um schwach gelblich bis leicht rötliche, zum anderen um hellgraue bis graue Lagen. Zwischen diesen Bändern zeigt der Marmor zumeist eine weiße Erscheinung. Die mittlere Korngröße ist nach makroskopischen Beobachtungen auf ca. 0,5 mm einzuschätzen. Somit ist der Marmor als feinkörnig zu bezeichnen.

Die schwach gelblichen bis leicht rötlichen Bänder besitzen eine Mächtigkeit vorwiegend im Bereich einiger Millimeter. Ihre Anordnung kann sowohl relativ streng parallel aber auch sehr unregelmäßig ausgebildet sein. Die Abstände untereinander befinden sich im Bereich einiger Zentimeter. Aufgrund von Erfahrungswerten ist anzunehmen, dass es sich hierbei um feinstkörnige Verwachsung von Dolomit und Calcit handelt. Darauf weist auch eine heterogene Rückwitterung des Marmors hin. Die schwach gelblich bis leicht rötlichen Bänder sind dabei durch eine wesentlich höhere Verwitterungsresistenz gegenüber den Hauptbereichen des Marmors gekennzeichnet und bilden ein positives Relief.

Für die hellgrauen bis grauen Bänder ist eine unregelmäßige Begrenzung zum umgebenden Gestein zu beobachten. Sie verlaufen mehr oder weniger parallel zu den schwach gelblichen Bändern. Die grauen Lagen erreichen Mächtigkeiten bis zu einigen Zentimetern. Der Materialwechsel ist hier vermutlich auf feinverteilten Graphit oder auch Pyrit im Gestein zurückzuführen. Die Rückwitterungsrate ist gleich derjenigen der Hauptbereiche des Marmors.

## DIE MÖRTEL

Für die Analyse der Mörtel wurden gezielt an unterschiedlichen Gebäudeteilen Bohrkerne entnommen, so dass möglichst alle eingesetzten Baustoffe (Marmor, Mörtel und Ziegel) beprobt worden sind. Der derzeitige Aufbau einer „originalen“ Marmorsäule ist in Abb. 2b dargestellt (frdl. Mitt. ARGE Pfanner).

In die ausgebohrten Marmorsäulen wurden Ziegelformsteine eingebracht. Der Zwischenraum von Marmor und Ziegel wurde mit einem Kalkmörtel vergossen. Für eine größere Stabilität des Tores sind in der Mitte der Säulen Stahlkreuzstützen eingebracht worden. Die restlichen Zwischenräume wurden mit Zementmörtel vergossen. Die mögliche Variabilität solcher Aufbauten ist in den in Abb. 9 gegebenen Bohrkerne beobachtbar.

Die weißen Deckschichten, die in den 20er Jahren verwendet wurden, repräsentieren einen Kalkmörtel, bei dem sowohl das Bindemittel als auch der Zuschlag fast ausschließlich aus Kalk und/oder Dolomit besteht. Der Zuschlag setzt sich aus zumeist polygonalen Dolomitmörnern mit einer Korngröße im Bereich Feinsand (0,063 mm – 0,2 mm) zusammen. Der SiO<sub>2</sub>-Anteil ist mit 4,7 – 6,2% relativ gering und befindet sich im abgebundenen Bindemittel in Form von Calciumsilikathydraten. Im Gegensatz dazu besteht der Zuschlag der 50er Jahre aus Quarz und Feldspat und das Bindemittel vermutlich aus Calciumsilikaten und Calciumaluminatferrit. Der Verbund zwischen Bindemittel und Zuschlag ist in allen Fällen sehr gut.

Die Kalkmörtel der 20er Jahre sind zumeist grau. Der Zuschlag besteht aus Quarzkörnern. Diese besitzen eckige Kornformen und haben eine Korngröße von Mittelsand (0,2 mm – 0,63 mm). Das Bindemittel besteht aus einem schwach hydraulischen Kalk. Bei einigen Kalkmörteln wurden mittels REM-Untersuchungen Zementklinkerreste nachgewiesen. Gelegentlich sind Ettringitkristalle im Gefüge zu beobachten. In den Röntgenaufnahmen konnten als Hauptbestandteile Quarz und Calcit nachgewiesen werden. Daneben wurde Mikroklin, Albit, Portlandit, Gips und Spuren von Ettringit diagnostiziert. Die Kalkmörtel aus dem Wiederaufbau in den 50er Jahren des 20sten Jahrhunderts besitzen im Vergleich zu den anderen Kalkmörteln ein höheres Bindemittel/Zuschlag-Verhältnis. Das Bindemittel besitzt ferner einen deutlich höheren hydraulischen Anteil.

Der Zuschlag der Zementmörtel besteht aus gerundeten bis leicht polygonalen Quarzkörnern mit einer Korngröße im Fein- bis Mittelsandbereich (0,063 mm – 0,63 mm). In den hydraulischen Bindemitteln wurden deutliche Gehalte von Calciumsilikathydraten und Zementklinkerresten nachgewiesen (s. Abb. 10). In den Poren sind vereinzelt Ettringitkristalle zu sehen. Im Unterschied zu den Kalkmörteln wurde in den Röntgen-Diagrammen ein deutlicher Portlandit-Peak nachgewiesen, was auf eine nicht vollständige Karbonatisierung hinweist, wodurch auch der Korrosionsschutz des Stahls gewährleistet ist.

Die Ziegel sind makroskopisch durch eine gelblich bis orange Farbe gekennzeichnet, was für eine geringe Brenntemperatur hinweist. Die Ziegel besitzen eine Porosität von ca. 45 Vol.-%, wobei es sich bei den Poren im Wesentlichen um Kapillarporen (30 nm-100 µm) handelt.

## RESTAURIERMÖRTEL

Auf die physikalisch-mechanische und chemisch-mineralogische Anpassung des Restauriermörtels an die vorhandenen Marmore des Markttors von Milet wurde besonderer Wert gelegt, da wie bereits erwähnt zahlreiche originale Marmorteile u. a. durch den Einsatz ungeeigneter Mörtel zerstört bzw. geschädigt worden sind. Das übergeordnete Ziel der Restaurierung muss die Erhaltung des Markttors unter Verwendung möglichst vieler Originalteile aus Milet und mit kompatiblen Mörteln und Steinersatzstoffen sein.

Die im Folgenden beschriebenen Ziele und die daraus resultierenden Eigenschaften eines kompatiblen Mörtels sind für die Entwicklung definiert worden (s. auch Tabelle 1). Die Mörtelfestigkeit und der E-Modul müssen an den Marmor angepasst sein, da sonst Störungen an der Verbundzone Marmor/Mörtel vorprogrammiert sind. Des Weiteren wird das Schwinden des Mörtels auf ein Minimum beschränkt, damit der Verbund Mörtel/Marmor

nicht beeinträchtigt wird. Der Calciumhydroxid-Gehalt soll so gering wie möglich sein, um Verfärbungen der Marmore und Ausblühungen zu vermeiden. Ein gewisser Anteil von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  muss jedoch im Mörtel enthalten sein, um den Stahl vor Korrosion zu schützen. Der Mörtel soll ferner nicht zum Wasserabsondern neigen, da das Eindringen der Porenlösung in den Marmor Verfärbungen oder auch die Zerstörung der Korn/Korn-Verbindungen zur Folge haben könnte. Gleichzeitig ist ein Selbstverdichtungseffekt des Mörtels wünschenswert, um während des Einbaus die Säulen nicht mit zusätzlich durch die Verdichtung eingebrachter Energie belasten zu müssen.

Um dem erarbeiteten Anforderungsprofil der Restauriermörtel zu entsprechen, wurden bei der Mörtelentwicklung folgende Baustoffe verwendet:

- Weißzement: CEM I 52,5 ist geeignet wegen seiner Farbe, dem geringen  $\text{C}_4\text{AF}$ -Gehalt und der hohen Frühfestigkeit.
- Metakaolin bewirkt eine Reduzierung des  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Gehaltes, wodurch das Verfärbungsrisiko des Marmors durch alkalische Porenlösung minimiert werden kann.
- Quarzsand und Kalksteinmehl sollen eine optimale Konsistenz und hohe Packungsdichte des Mörtels gewährleisten.
- Fließmittel setzen den Wasser/Bindemittel-Wert (w/b) herab und verringern so das Schwinden des Mörtels.
- Luftporenbildner sollen die Mörteldichte reduzieren, um den Untergrund sowie die Struktur des Markttores nicht zusätzlich zu belasten.

Im Folgenden sind die Eigenschaften der verwendeten Baustoffe detailliert aufgelistet:

#### Weißzement CEM I 52,5

- hohe Festigkeit und schnelle Festigkeitsentwicklung
- hoher Weißgrad
- normale Hydratationswärme und Nacherhärtung
- hohe Feinheit

#### Metakaolin

- hohe puzzolanische Reaktivität
- geringe Dichte
- hohe Feinheit
- hoher Weißgrad

#### Kalksteinmehl

- hohe Reinheit
- hoher Weißgrad
- günstige Korngrößenverteilung

#### Quarzsand

- hohe chemische Reinheit (99,8%  $\text{SiO}_2$ )
- hohe mechanische Festigkeit
- günstige Korngrößenverteilung

#### Fließmittel

- Reduktion des Wasseranspruches

#### Luftporenbildner

- Bildung von Luftporen zur Dichtereduzierung

Die Mörtel wurden mit Bindemittel/Zuschlag-Verhältnissen von 1/2, 1/3, 1/4 und mit 20 M.-% oder 30 M.-% Metakaolin hergestellt. Das Gewichtsverhältnis von Kalksteintmehl/Quarzsand betrug 2/3. Von jeder Mischung wurde ein Mörtel mit Fließmittel und Luftporenbildner, einer nur mit Fließmittel und einer ohne Zusatzmittel angefertigt.

Die Mörtel wurden auf ein einheitliches Ausbreitmaß (DIN 1053-3) von 24 – 25 cm eingestellt, da bei dieser Konsistenz eine optimale Verarbeitbarkeit und eine ausreichende Fließfähigkeit des Mörtels erreicht wird. Durch den Einsatz von Fließmittel und/oder Luftporenbildner konnte der Wassergehalt erheblich reduziert werden. Durch Zugabe von Zusatzmitteln konnte ein maximales Wasser/Bindemittel-Verhältnis von 0,48 realisiert werden. Der Luftporengehalt (DIN 18555-2) der Mörtel mit Fließmittel betrug ca. 3 % und ohne Zusatzmittel wurden Werte unter 1 % erreicht. Bei Mischungen mit Fließmittel und Luftporenbildner lagen die Luftporengehalte zwischen 10 und 22 %. Diese stark schwankenden Werte sind auf eine Unverträglichkeit der Additive zurückzuführen. Ein Nachteil beim Einsatz des verwendeten Fließmittels ist allerdings die kurze Verarbeitungszeit der Mörtel (DIN EN 1015-9) von nur ca. 20 Minuten.

Ein Ausblühverhalten der Mörtel konnte während der Wässerungszyklen nicht festgestellt werden. Die Ergebnisse aus der Quecksilberdruckporosimetrie stützen die Behauptung der Inkompatibilität von Fließmittel und Luftporenbildner, da gerade in den kombinierten Mischungen erhöhte Kapillarporengehalte gemessen worden sind. Die Mörtel mit einem Bindemittel/Sand Verhältnis von 1/4 wiesen die geringsten Schwindwerte von ca. 0,9 ‰ nach 28 Tagen auf (Tabelle 2). Außerdem konnten weder Schwindrisse noch Störungen der Verbundzone Mörtel/Marmor festgestellt werden. Da der mittelkörnige Marmor eine Festigkeit von 59 N/mm<sup>2</sup> aufweist, wird als Kriterium für die Auswahl geeigneter Restaurierungsmörtel eine Druckfestigkeit um 50 N/mm<sup>2</sup> festgesetzt. Der Ca(OH)<sub>2</sub>-Gehalt der Favoritenmörtel beträgt 1,2 - 2,7 Gew.-%, dieser niedrige Wert ist auf den hohen Metakaolin- und einen geringen Zementgehalt zurückzuführen. Eine Überprüfung der Alkalität wies einen ausreichenden Stahlschutz aus.

Es wurden ferner Kompatibilitätsprüfungen zur Früherkennung möglicher Verfärbungen des Marmors durch die Einwirkung der Porenlösung des Mörtels durchgeführt.

Zu diesem Zweck wurden Dünnschliffe mit in Mörtel eingebettetem Originalmarmorgranulat hergestellt. Der vorhandene Originalmarmor wurde dazu auf eine Korngröße von 2 – 4 mm mit einer Beißzange vorsichtig zerkleinert. Die Mörtel mit Marmor als Zuschlagersatz wurden mit dem Bindemittel/Zuschlag-Wert (b/z-Wert) von 1:2 hergestellt. Aufgrund des hohen Zement- und dem relativ niedrigen Puzzolananteil von 20 Gew.-% wies diese Mischung auch den höchsten Ca(OH)<sub>2</sub>-Gehalt auf.

Für die Anfertigung der Laborprobekörper werden Normprismenformen mit den Abmessungen (40 mm\*40 mm\*160 mm) nach DIN 1164 Teil 7 benutzt. Zwei Tage nach der Herstellung werden die Marmorprismen ausgeschalt und in drei gleiche Teile zersägt. Ein Teil wird im Klimaraum bei einer Temperatur von 20°C und 60 % rel. Luftfeuchte, der andere Teil in einer Calciumhydroxidlösung (0,2 g/l) gelagert und der Dritte wird in ein Wasserbad

gelegt. Nach 28 Tagen Probenlagerung sind Dünnschliffe von den jeweiligen Proben angefertigt worden, auf denen mögliche Verfärbungen mit Hilfe der Polarisationsmikroskopie untersucht werden können. In Abb. 11 ist die Kontaktfläche Marmor/Mörtel einer im Wasserbad gelagerten Probe zu sehen. Der Verbund Marmor/Mörtel weist keine Störungen auf, da die Kontaktfläche gut ausgebildet ist. Es konnten bei allen Proben keine Verfärbungen festgestellt werden. Des Weiteren weist der Mörtel ein dichtes Gefüge auf, welches auch in REM-Aufnahmen der Favoritenmörtel zu erkennen ist (Abb. 12).

Eine abschließende Untersuchung der Kompatibilität des Marmors mit den verwendeten Zusatzmitteln wurde mit den Favoritenmischungen (Tabelle 2) durchgeführt. Der Frischmörtel wurde in ausgebohrte Marmorzylinder mit einem Innendurchmesser von 3 cm gefüllt. Je Mischung wurde ein Zylinder des grobkörnigen und einer des feinkörnigen Marmors verwendet. Die Zylinder lagerten, mit Kunststoffolie abgedeckt, 7 Tage bei einer Temperatur von 20°C und 60 % relativer Luftfeuchtigkeit. Beim Kontakt des Frischmörtels mit dem Marmor stellte sich ein unterschiedliches Saugverhalten der beiden Marmorarten ein, was sich in der Verdunklung der Außenflächen infolge Wasseraufnahme zeigte. Die Probe mit dem grobkörnigen Marmor zeigte ein schnelleres Saugverhalten als die Probe mit dem mittelkörnigen Marmor. Zur eindeutigen Dokumentation möglicher Verfärbungen sind die Marmorproben vor und 7 Tage nach dem Versuch fotografiert worden. Beim Vergleich der Bilder wird deutlich, dass der reine Calcitmarmor weiß bleibt (Abb. 13a/b), der mittelkörnige Dolomitmarmor aber eine leicht gelbliche Verfärbung unabhängig von der verwendeten Mörtelmischung angenommen hat (Abb. 14a/b). Dieser Farbunterschied wird durch die noch enthaltene Feuchte verursacht. Eine ähnliche Gelbfärbung tritt beim Nässen des Dolomitmarmors mit destilliertem Wasser auf. Nach der vollständigen Trocknung haben beide Marmore wieder ihre ursprüngliche Farbe. Die kleineren Porenradien des mittelkörnigen Marmors und die bereits fortgeschrittene Kornentfestigung des Calcitmarmors sowie das differente Saugverhalten lassen auf ein langsames Trocknungsverhalten des Dolomitmarmors schließen. Zudem treten bei keiner Probe Risse bzw. Ablösungen der Kontaktfläche Marmor/Mörtel infolge von Schwinden auf. Da nach 7 Tagen ein Großteil des Schwindens bereits abgeschlossen ist, treten vermutlich auch später keine Rissbildungen auf.

Die entwickelten Mörtel aus der Kombination von Puzzolanen, Weißzement, definiert zusammengesetzten Zuschlägen (Quarzsand, Kalksteinmehl) und chemischen Additiven sind kompatibel mit den Marmoren des Markttores von Milet. Ferner sind die Mörtel ausreichend alkalisch, um den Stahl vor Korrosion schützen zu können. Die Verfärbung des Dolomitmarmors ist durch Trocknung reversibel. Weder der Calciumhydroxidgehalt noch die verwendeten Zusatzmittel beschleunigen nach bisherigen Erkenntnissen den Zerfall des Marmors und sind auch in Verbindung mit Stahl einsetzbar. Die Verträglichkeit der entwickelten Mörtel mit den im Bestand vorhandenen Steinerzergänzungstoffen gilt auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen als gesichert. Die entwickelten Favoritenmörtel (Tabelle 2) optimal den geforderten physikalisch-mechanischen und den chemisch-mineralogischen Anforderungen angepasst worden und können am Markt unbedenklich eingesetzt werden.

## TABELLEN

Tabelle 1: Erwünschte Eigenschaften des Mörtels

<b>erwünschte Eigenschaften des Mörtels</b>	<b>Ziele</b>
an den Marmor angepasste Festigkeit/ E-Modul	keine Risse und Abplatzungen infolge unterschiedlicher Dehnungen
niedrige Schwind-/ Quellmaße	guter Verbund Marmor/Mörtel
geringer Calciumhydroxidgehalt mit dennoch ausreichend hoher Alkalität	keine Verfärbung des Marmors durch Poren- lösung, Korrosionsschutz des Stahls
hohes Wasserrückhaltevermögen	Vermeidung des Eindringens von Porenlösung in den Marmor
angepasstes Abbindeverhalten	
geringe Ausblühneigung	Vermeidung von Ausblühungen auf den Marmoroberflächen

Tabelle 2: Die Favoritenmörtel

<b>Mörtelmischung mit Fließmittel</b>	<b>Druckfestigkeit [N/mm<sup>2</sup>]</b>	<b>Schwindmaß [%]</b>
b/z 1:4, 20 Gew.-% Metakaolin	50,6	0,86
b/z 1:4, 30 Gew.-% Metakaolin	52,8	0,93

## ABBILDUNGEN



Abb. 1: Das Markttor von Milet im Pergamon Museum auf der Museumsinsel in Berlin

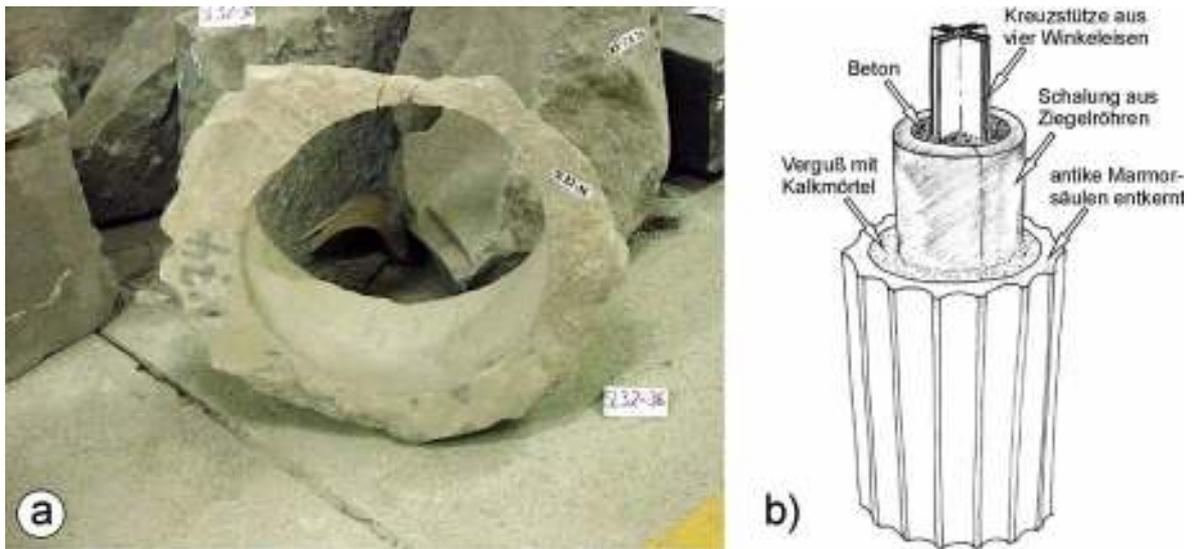


Abb. 2: a) ausgebohrte, im Keller des Pergamon Museum gelagerte Säule des Marktttores von Milet und b) schematischer Aufbau der Marmorsäulen am Gebäude mit Metallstützkonstruktion im Zentrum umgeben von Beton, Ziegel und Kalkmörtel sowie äußerem Rand aus Originalmarmor (Abb. 2b zur Verfügung gestellt von Dr. M. Pfanner).



Abb. 3: Historische Bilder zeigen a) den Aufbau des Giebelbeiches der in den 20 Jahren des letzten Jahrhunderts stattfand und b) die Situation nach einem direkten Luftminentreffer des zweiten Weltkrieges.

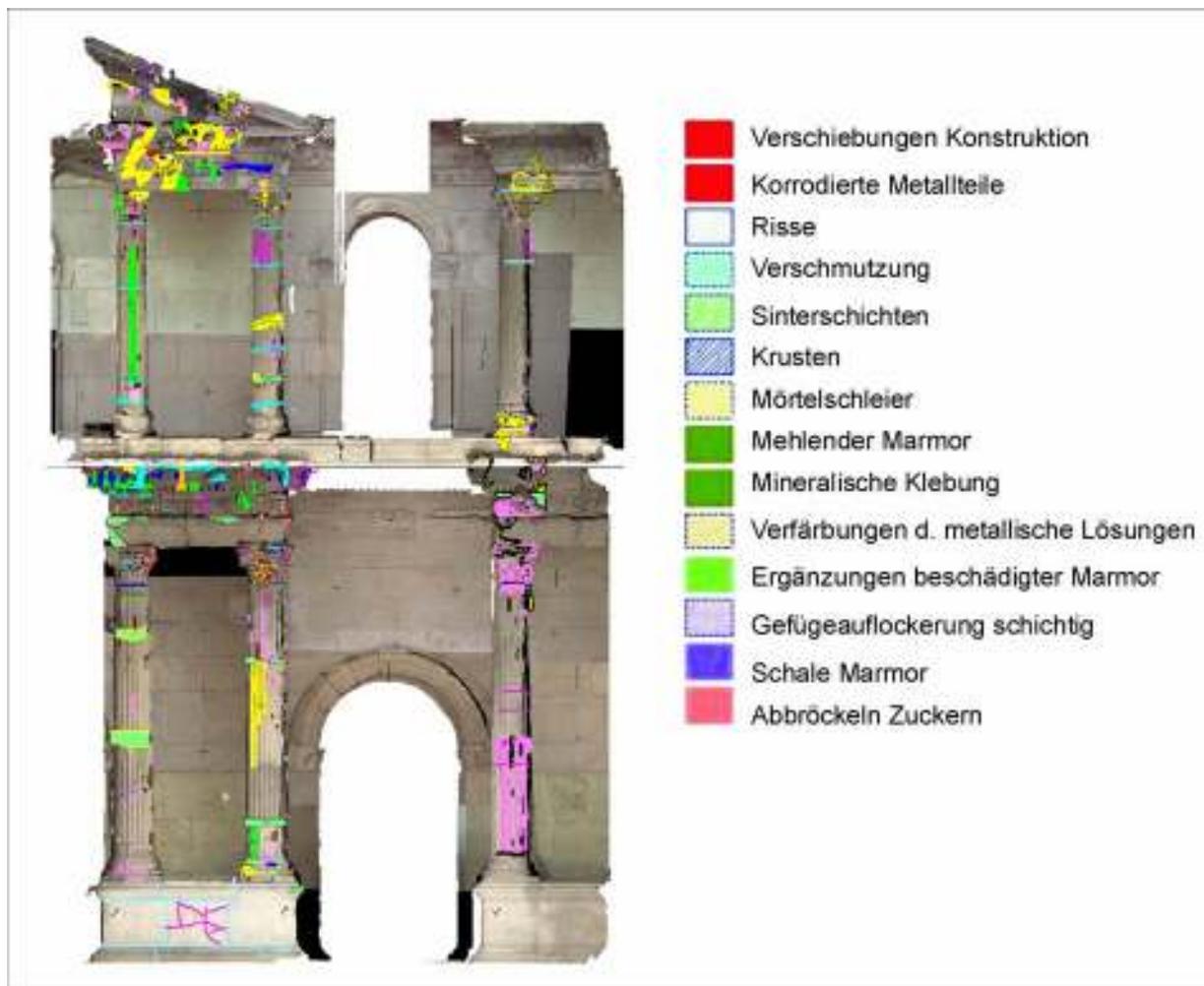


Abb. 4: Teilausschnitt der Schadenskartierung an einer Musterachse des Marktttores durchgeführt von der ARGE Speiser Endemann.

a



b



c



d



e



f



g



h





i



j

k



l

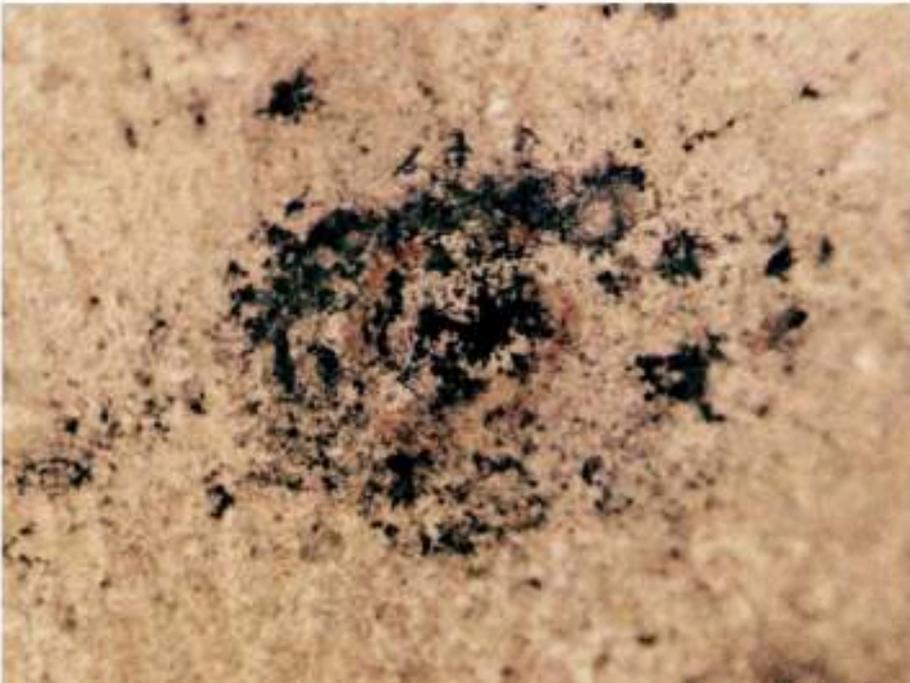




Abb. 5 Schadensbilder

- a) Risse mit Rostläufer, b) Rostphänomene an statisch belasteten Trägern, c) Rissbildungen und Auflockerungszonen in konstruktiv brisanten Positionen, d) Detailfoto zu 5c, e) Risse sind in den Säulen ein allgegenwärtiges Problem, wobei hier noch Abplatzungen durch den Bombentreffer beobachtbar sind, f) Riss in Architekturfragmenten aus Originalmarmor, unter einer dünnen Schicht (Patina, Lasur) ist der weiße Marmor deutlich erkennbar, g) Sinterbildungen sind häufig entlang geöffneter Risse in den Kannelurenstegen der Säulen beobachtbar, h) Spannungs-induzierte Abplatzungen an Säulenimitaten, i und j) Mörtelschleier und Sinterbildungen sind ein allgegenwärtiges Problem, k) Salzausblühungen an Mörtelergänzungen aus den 50-iger Jahren und l) auffällige schwarzbraune Verfärbung der Oberfläche durch Mikroorganismen, m) Schutzanstriche im Bereich der Kapitelle führen zu deutlichen Verfärbungen

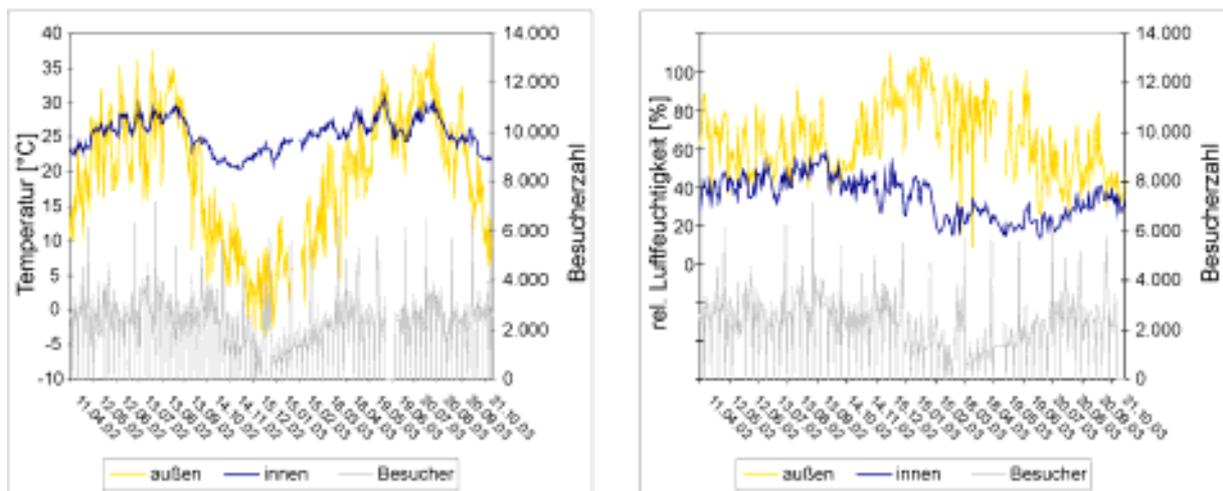


Abb. 6 Tagesmittelwerte a) der Temperatur und b) der relativen Luftfeuchtigkeit eines Messfühlers im Außen- und eines Messfühlers im Innenbereich sowie die Besucherzahl im Verlauf eines Jahres.

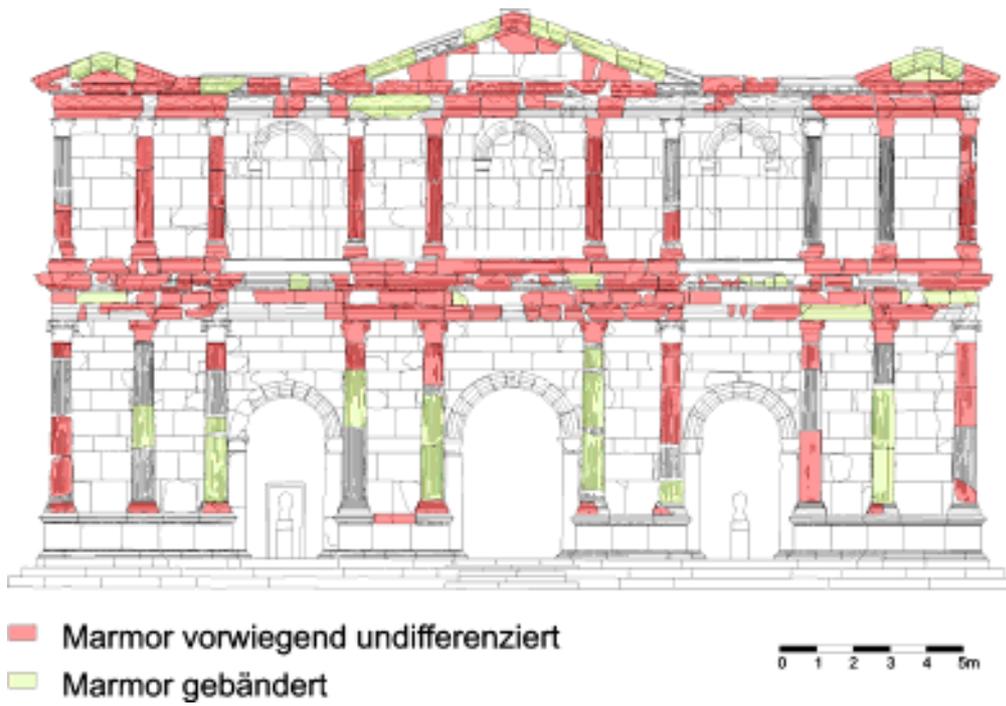


Abb. 7: Lithologische Karte zeigt die Verteilung der beteiligten Marmortypen am Markttor.

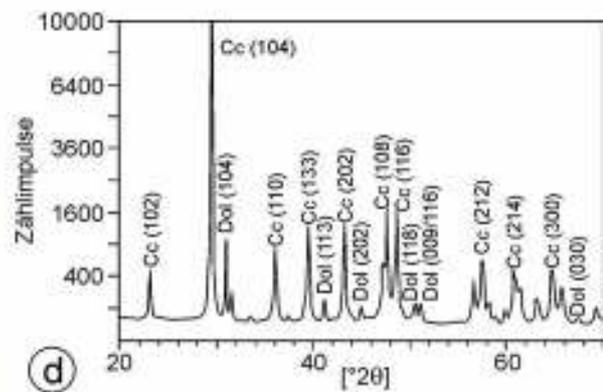
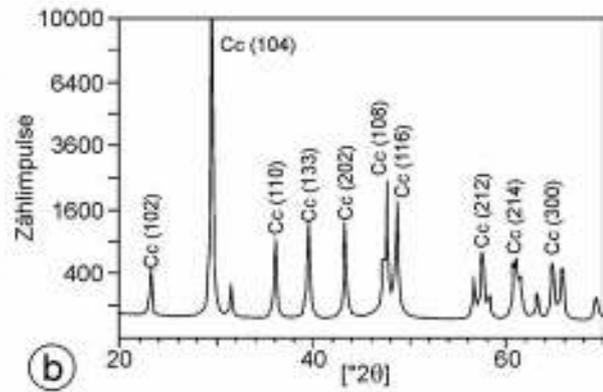


Abb. 8: Makroskopisches Erscheinungsbild und mineralogische Zusammensetzung der am Marktort von Milet verbauten Marmortypen: a) Vorwiegend undifferenzierter Marmor und c) unregelmäßig gebänderter Marmor. In c) und d) sind die jeweiligen Diagramme der Röntgendiffraktometrie abgebildet. Im Gegensatz zum vorwiegend undifferenzierten Marmor weist der gebänderte neben Calcit (cc) auch geringe Mengen von Dolomit (dol) auf.

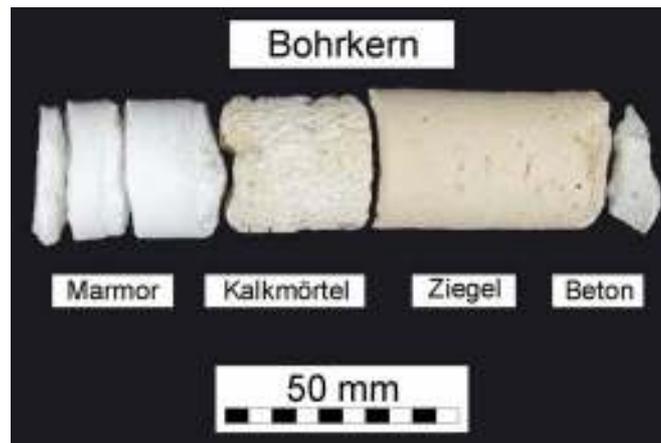


Abb. 9 Bohrkern und die beobachteten Geomaterialien, die den Aufbau der hohlgebohrten Marmorteile wiedergeben.

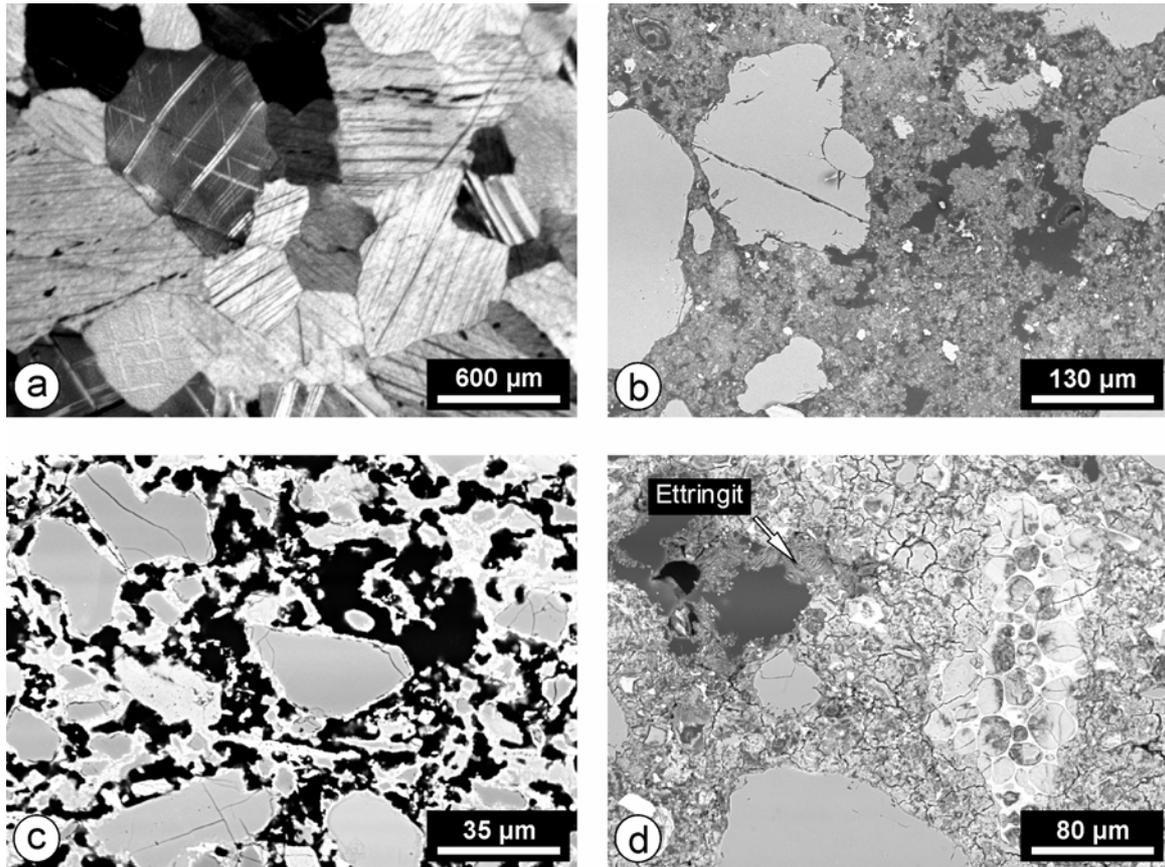


Abb. 10. Mikroskopische und Elektronenmikroskopische Aufnahmen von verschiedenen am Markt von Milet verbauten Geomaterialien.

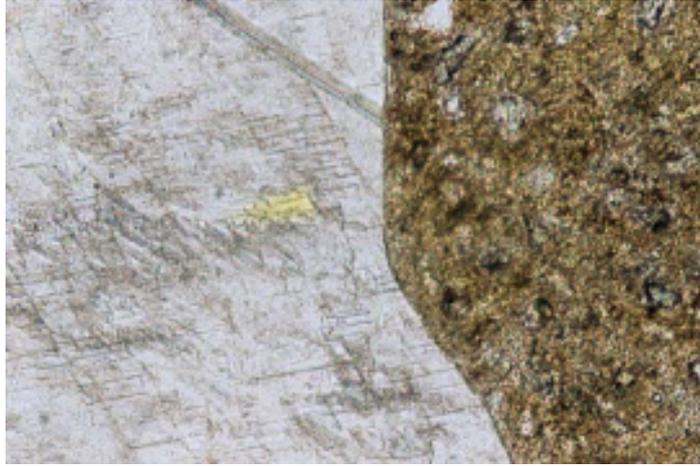


Abb. 11: Wassergelagerte Probe mit Marmorgranulat als Zuschlagersatz, Durchlicht, Bildbreite:0,79 mm.

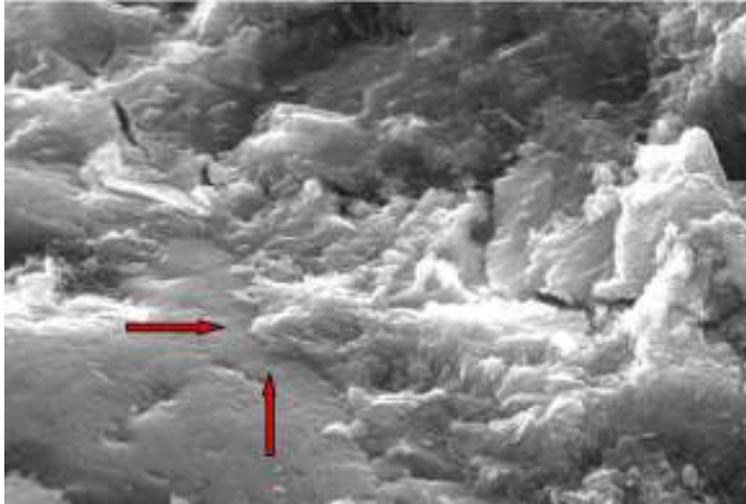


Abb.12: Favoritenmörtel b/z 1:4,20 Gew.-% Metakaolin, SE-Bild, Bildbreite: 29,1  $\mu\text{m}$   
(Pfeile: guter Verbund von Zuschlag/Bindemittelmatrix).

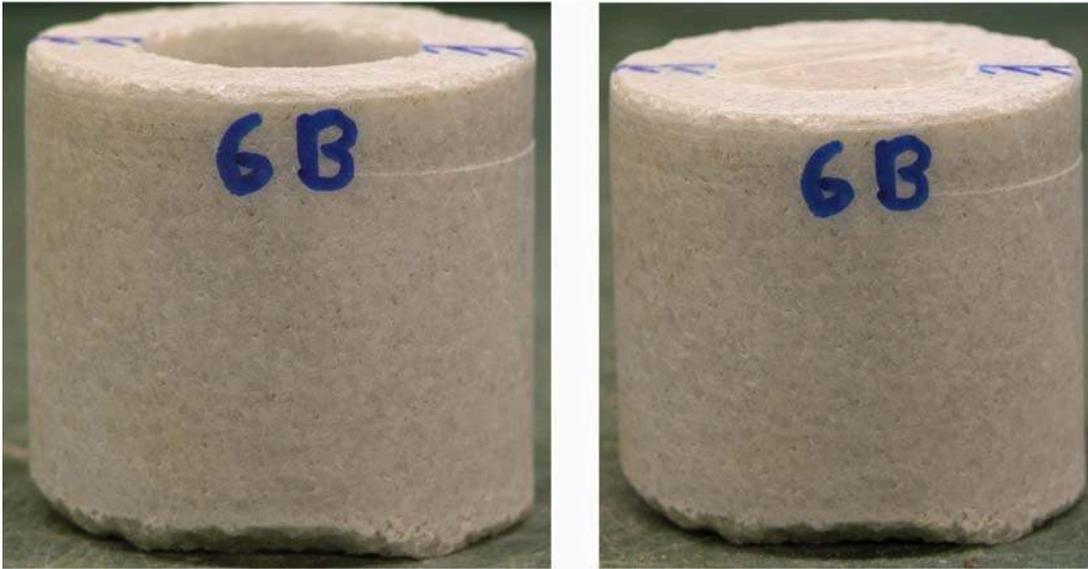


Abb. 13a/b: grobkörniger Marmorzylinder ohne/mit Favoritenmörtel

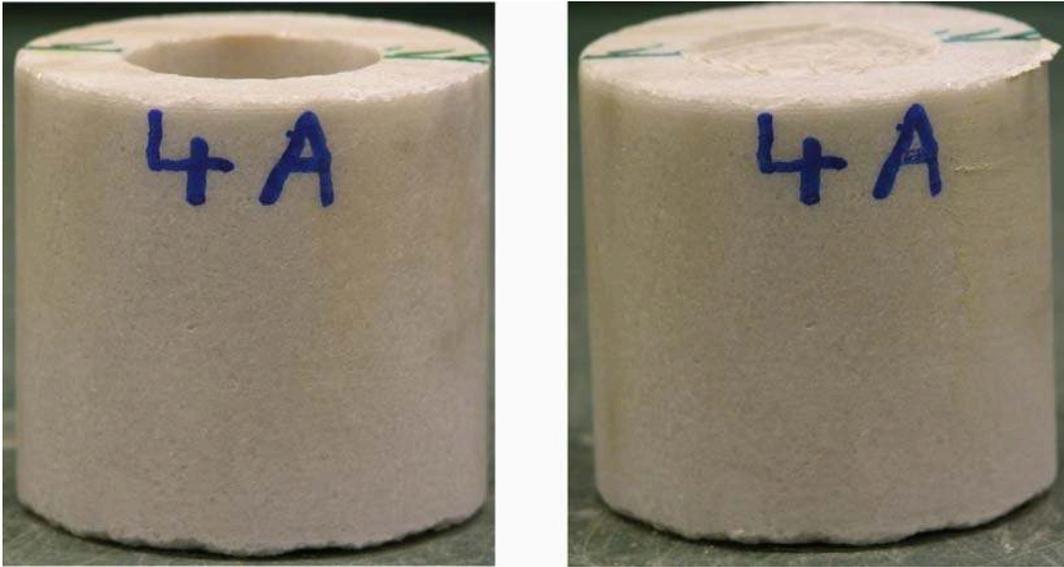


Abb. 14a/b: mittelkörniger Dolomitmarmor ohne/mit Favoritenmörtel

## Anlage 14

Radaruntersuchung am Markttor von Milet Pergamon-  
Museum Berlin.

Sontec GmbH, Berlin



---

## Pergamon Museum. Radaruntersuchung am Markttor von Milet.

### Bericht über die geophysikalische Prospektion

---

#### Projektdaten

Ort:	Pergamon Museum
Objekt:	Markttor von Milet
Zeitstellung:	
Fragestellung:	Säulenaufbau der rekonstruierten Säulen
Radaruntersuchung durchgeführt von:	S. Kroll, D. Guldin
Datum der Untersuchung:	08.05.2002
Bericht und Interpretation:	S. Kroll
Datum des Berichts:	27.05.2002

Am 08. Mai 2002 wurden von der Firma SONTEC GmbH im Auftrag von Prof. Dr. S. Siegesmund, GZ-Göttingen, am Markttor von Milet (Pergamonmuseum, Berlin) geophysikalische Untersuchungen durchgeführt. Zielstellung war es hierbei, im Vorfeld der geplanten Restaurierungsarbeiten möglichst umfassende Informationen über den Aufbau des Markttores resp. der Säulen zu erhalten. Die Firma SONTEC erklärte sich bereit, unentgeltlich - im Rahmen eines Wissenschaftssponsoring, siehe Rechnungsanlage - Möglichkeiten hierzu aufzuzeigen und deren praktische Durchführbarkeit zu testen. Die Ergebnisse dieses Tests werden in diesem Bericht dargestellt.

Als einzig nicht-invasive Verfahren, die unter vertretbarem Aufwand die erforderlichen Informationen liefern könnten, kamen in die engere Auswahl: Potentialverfahren (hochauflösende Magnetik, Geoelektrik, Mikrogravimetrie), Verfahren mit Schallwellen (Ultraschall), sowie Verfahren mit elektromagnetischen Wellen (Radar). Während bei den passiven Potentialverfahren auf Grund des sich im Inneren des Tores befindlichen freitragenden Metallgerüsts mit keinerlei aussagekräftigen Ergebnissen zu rechnen ist, erschienen uns die aktiven Verfahren (Ultraschall, Radar) bezüglich der Fragestellung am geeignetsten. Da Ultraschalluntersuchungen bereits von GZ-Göttingen unter der Leitung von Dr. S. Siegesmund durchgeführt wurden, beschäftigt sich dieser Bericht mit den Möglichkeiten, die eine Radaruntersuchung der Säulen oder gar des gesamten Tores bieten kann.

## 1. Physikalische Grundlagen

Beim Bodenradar handelt es sich um ein elektromagnetisches Reflexionsverfahren bei dem ein Signal in den Untergrund abgestrahlt wird. Dieses wird an Inhomogenitäten reflektiert und an der Oberfläche wieder empfangen und aufgezeichnet. Anhand der Laufzeit des Signals von der Oberfläche zum Störkörper und zurück erfolgen genaue Angaben über die Tiefenlage von Objekten bzw. Mächtigkeiten von Schichten. Eine erste Auswertung erfolgt direkt vor Ort.

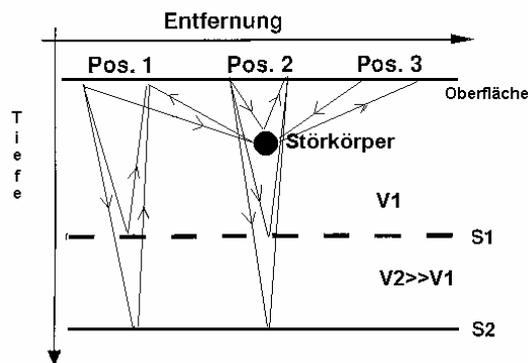


Abb.1.1: Funktionsprinzip der Radarmessung  
 In den Untergrund abgestrahlte Energie wird an Schichtgrenzen und Störkörpern teilweise reflektiert und an der Oberfläche wieder aufgezeichnet.

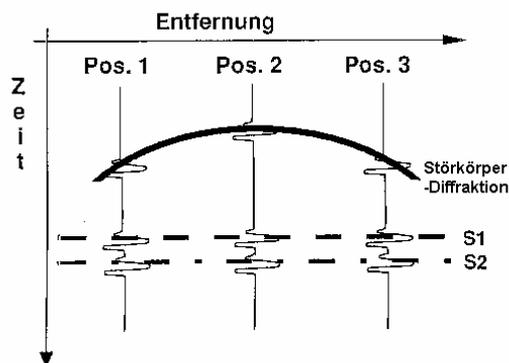


Abb.1.2: Meßergebnis (schematisch)  
 Die reflektierte Welle wird an der Oberfläche aufgezeichnet und ausgewertet.

Rohrleitungen, Kabel, metallische und nichtmetallische Objekte können in ihrer 3-dimensionalen Lage bestimmt werden. Im Gegensatz zu herkömmlichen induktiven Verfahren stellen auch moderne Materialien wie PVC oder Fiberglas bei der Radar-Ortung kein Problem dar. Geologische Strukturen können erfaßt und Hohlräume detektiert werden.

## 2. Durchführung der Messung

Zum Einsatz kam bei dieser Untersuchung ein Georadarsystem des Herstellers GSSI mit geschirmten Antennen einer Mittenfrequenz von 1,5 GHz. Die Antennen wurden direkt auf der Oberfläche des zu untersuchenden Mediums bewegt, die Meßwertaufnahme erfolgte kontinuierlich. Die laterale Auflösung der Meßwerte, getriggert über ein Laufrad mit angeschlossenem elektronischem Drehpulsgeber, liegt bei 1mm.

## 3. Ergebnisse

Eine Untersuchung an einer Wand, an der ein fehlender Marmorblock durch eine Ziegelaufmauerung ersetzt wurde, zeigt deutlich, wie sich die unterschiedlichen Materialeigenschaften auf die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen auswirken.

Abb. 3.1 zeigt ein solches Radargramm, welches an einer frei stehenden Mauer aufgenommen wurde. Die Reflektion an der Grenzschicht Material-Luft auf der Rückseite der Mauer ist erwartungsgemäß gut zu erkennen – wird allerdings zu deutlich unterschiedlichen Laufzeiten registriert. Aus der gemessenen Wandstärke von 55cm kann nun anhand der Zweiweglaufzeit die spezifische Geschwindigkeit des Marmors für elektromagnetische Wellen als  $v=10\text{cm/ns}$  ermittelt werden (die Verbindung aus Ziegel und Mörtel liegt sogar noch in etwa um den Faktor 1,5 darüber).

Diese Erkenntnis ist unabdingbar für die weitere Vorgehensweise, denn ohne Anhaltspunkt für die Geschwindigkeit des zu untersuchenden Mediums lassen sich die gewonnenen Laufzeiten nicht in Tiefenangaben umrechnen.

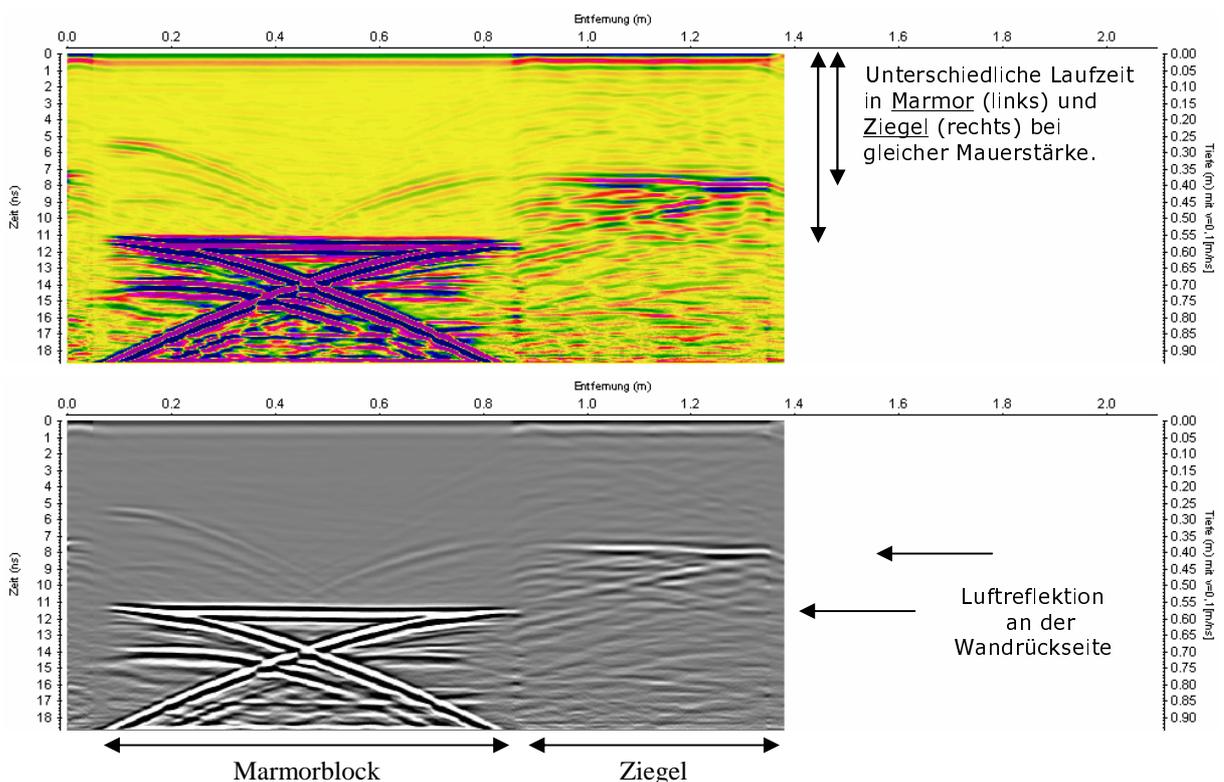


Abb.3.1: zwei unterschiedliche Darstellungen desselben Radargrammes, aufgenommen an einer freistehenden Mauer (Erläuterungen siehe Text).

Aufgrund der inhomogeneren Zusammensetzung des Ziegel-Mörtel-Paketes im Vergleich mit dem homogenen Marmorblock kommt es hier zu deutlichen Energieverlusten an diversen Grenzübergängen und kleinen Störkörpern, so daß das von der Rückseite empfangene Signal beim Ziegel deutlich schwächer ist.

Als nächstes wurden umlaufend um eine Säule einige Profile gemessen. Zielstellung war es hierbei, etwas über den inneren Aufbau der Säulen zu erfahren und zu versuchen, das in den Säulen verborgene Trägergerüst in seiner räumlichen Lage zu erfassen (s.Abb.3.2).

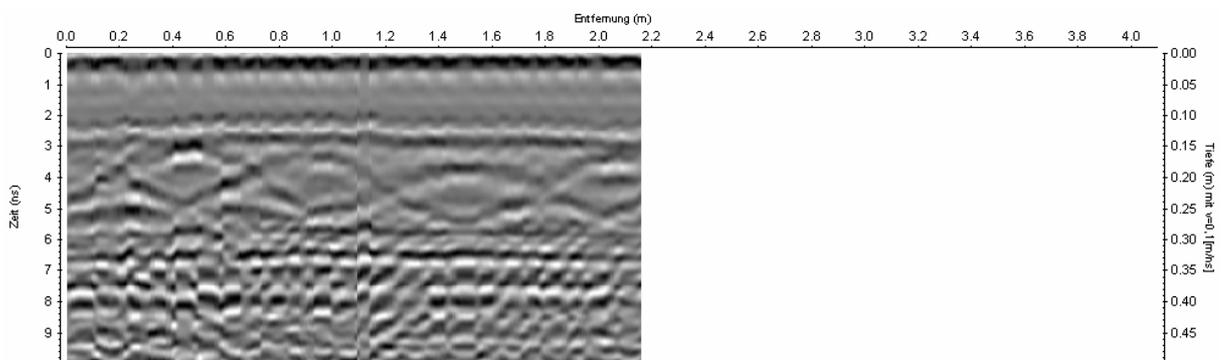


Abb.3.2: Radialprofil umlaufend um eine Säule

Als Bezugsfläche diente hierbei - in Ermangelung eines geeigneten Vermessungssystems - die Säulenoberfläche. Da diese jedoch nicht plan war, sondern quer zu den Kaneluren verlief, sehen die Daten etwas inhomogen aus (Abb.3.2).

Die wesentlichen Erkenntnisse bleiben jedoch sichtbar (Abb.3.3): Deutlich sind vier Diffraktionshyperbeln zu erkennen, welche von den vier Eckpunkten des innenliegenden Trägergerüstes (X-Profile) herrühren. Diese können in ihrer räumlichen Lage bestimmt werden und liefern somit die Lage des Metallgerüstes an diesen vier Punkten. Werden nun mehrere Radialprofile in unterschiedlichen Höhen aufgenommen, so kann die Lage des Gerüstes auf der gesamten Säulenlänge bezüglich der Säulenoberfläche (oder eines geeigneteren Bezugssystems) bestimmt werden. Ein gängiges Verfahren, welches in etwas anderen Dimensionen bereits seit geraumer Zeit mit Erfolg z.B. zur Qualitätskontrolle eingebauter Dübel auf Betonautobahnen eingesetzt wird.

Sofern eine exakte Vermessung der Säulen stattgefunden hat und CAD-Pläne bestehen, kann die Lage des Gerüstes mit minimalem Aufwand in die bestehenden 3D-Pläne integriert werden.

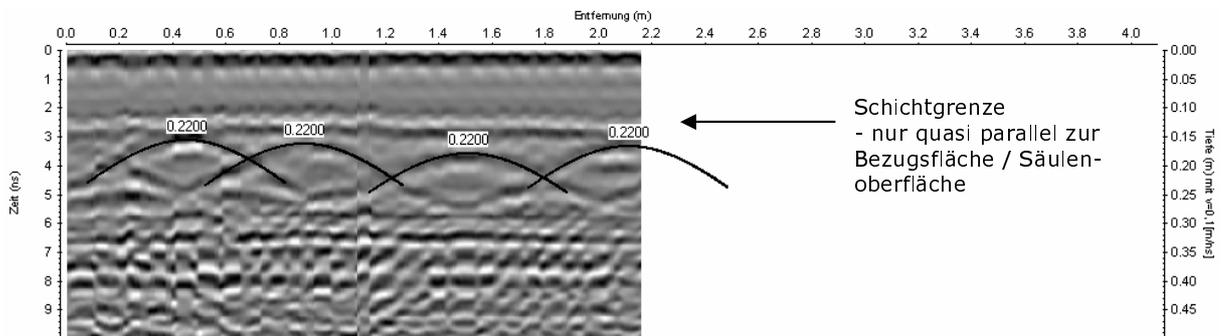


Abb.3.3: Radialprofil aus Abb.3.2 mit eingezeichneter Schichtgrenze und Diffraktionshyperbeln

Wie aus der Abbildung zu entnehmen ist, liegen die Eckpunkte des X-Trägers (=Scheitelpunkte der Hyperbeln) nicht symmetrisch d.h. nicht in einer einheitlichen Tiefe. Hieraus kann man schliessen, das entweder der Träger nicht symmetrisch aufgebaut ist oder leicht gegen die Säule verkippt ist. Hier kann nur eine detailliertere Untersuchung Aufschluß geben.

Die Krümmung der Diffraktionshyperbeln läßt einen Rückschluß auf das umgebende Material zu, und zwar handelt es sich hier um einen – in bezug auf elektromagnetische Wellen – sehr schnellen Baustoff mit über 0,2m/ns, deutlich zu unterscheiden von dem umgebenden Marmor mit 0,1m/ns. Der Übergang zwischen dem Marmor und diesem Mörtel ist insofern ebenfalls sehr gut ausgeprägt (Abb.3.3) und liegt bei etwa 10 cm Tiefe, jedoch umlaufend nicht überall gleich. Das Säulenmaterial wurde also augenscheinlich bis auf etwa 10 cm entkernt – jedoch nicht 100%ig symmetrisch.

Längsprofile entlang der Säule, hier: von oben nach unten, scheinen diese Ergebnisse zu bestätigen (s.Abb.3.4). Zunächst einmal erscheinen diese Datensätze deutlich ruhiger, was darauf zurückzuführen ist, das hier die Bezugsfläche nahezu eben ist: die Kaneluren der Säulen.

Ferner erscheinen wiederum deutlich zwei Grenzschichten, und zwar ist dies zum einen der Übergang Marmor-Mörtel (Abb.3.5, I), zum anderen die Grenze Mörtel-Metalträger (II). (Alles, was darauf zeitlich noch folgt, sind Störreflexionen von der Seite bzw. Multiple, da das Metall für die elektromagnetischen Wellen ein undurchdringbares Hindernis darstellt. Es sei erinnert: wir registrieren Zeiten, keine Entfernungen.)

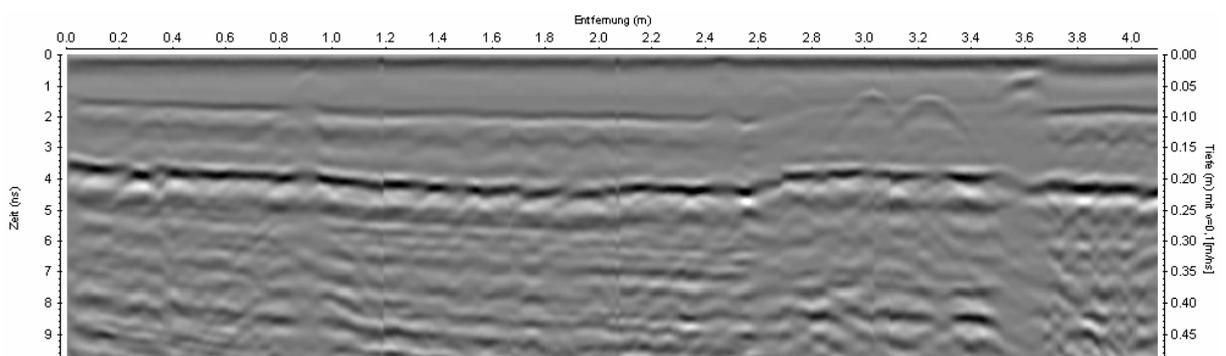


Abb.3.4: Längsprofil entlang einer Säule

Deutlich sichtbar wiederum erscheinen Materialunterschiede an den restaurierten Bereichen. Dadurch, daß mehrere Parallelprofile aufgenommen wurden (in diesem Bericht werden immer nur einzelne Beispiele angeführt), lassen sich die Diffraktionshyperbeln im Bereich der Betonreplikation als zwei umlaufende Rundeisen/Eisengurte deuten. Auch hier ist wieder zu bemerken, daß der Beton in bezug auf den Marmor für elektromagnetische Wellen deutlich schneller ist, d.h. der sichtbare Metallkern wirkt anscheinend „nach oben“ verschoben. Das scheinbare „Einfallen“ der zwei auszumachenden Grenzschichten läßt sich dadurch erklären, daß die Bezugsfläche ( $t$  bzw.  $x = 0$ ) - wie weiter oben schon erläutert - die Säulenoberfläche war, d.h. da die Säulen nach unten hin ausbauchen spiegeln die eigentlich senkrecht stehenden Grenzflächen hier die Form der Säulenoberfläche wider.

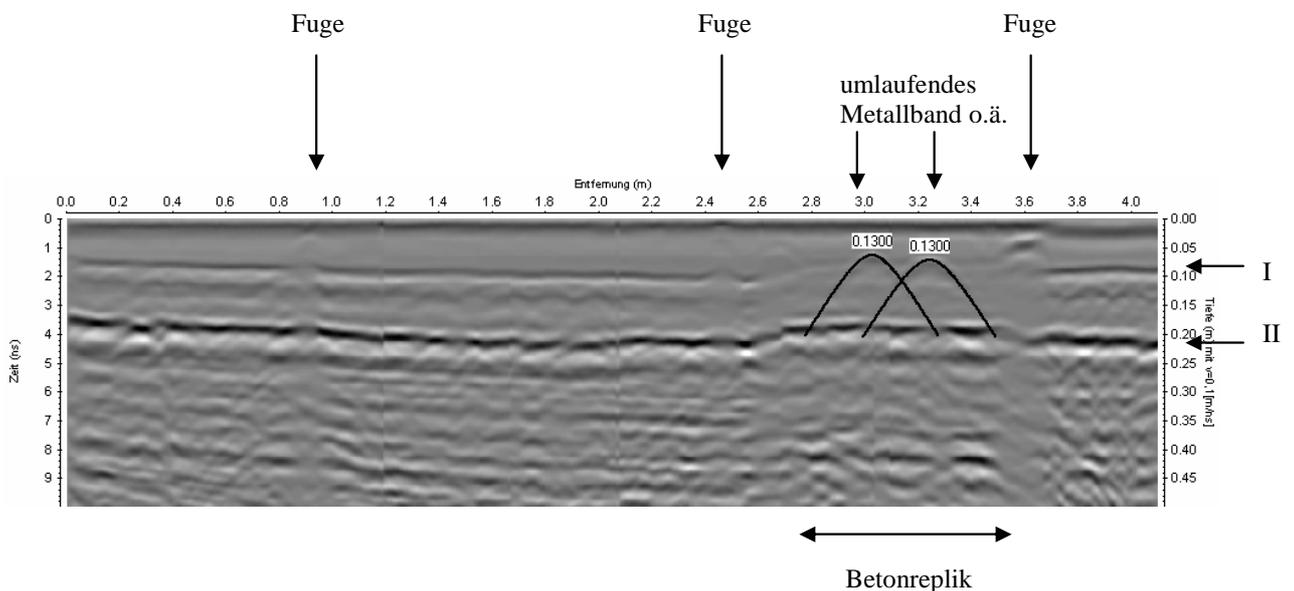


Abb. 3.5: wie 3.4, jedoch mit Erläuterungen und den Übergängen Marmor-Mörtel (I) und Mörtel-Metall (II)

Eine Untersuchung des Bodenaufbaus im Treppen-/Durchgangsbereich zeigt auch hier interessante Ergebnisse. So wurde zunächst die oberste Treppenstufe betrachtet (Abb.3.6): Hier zeigt sich, das der Bereich der sichtbaren Stufe (ca. 20 cm) in der Tat offensichtlich aus Marmor besteht. Der Unterbau, d.h. der Teil, der von der folgenden Stufe verdeckt wird, zeigt aber einen völlig abweichenden Aufbau – und zwar auch abweichend von dem bereits untersuchten Ziegel-Mörtel-Verbund.

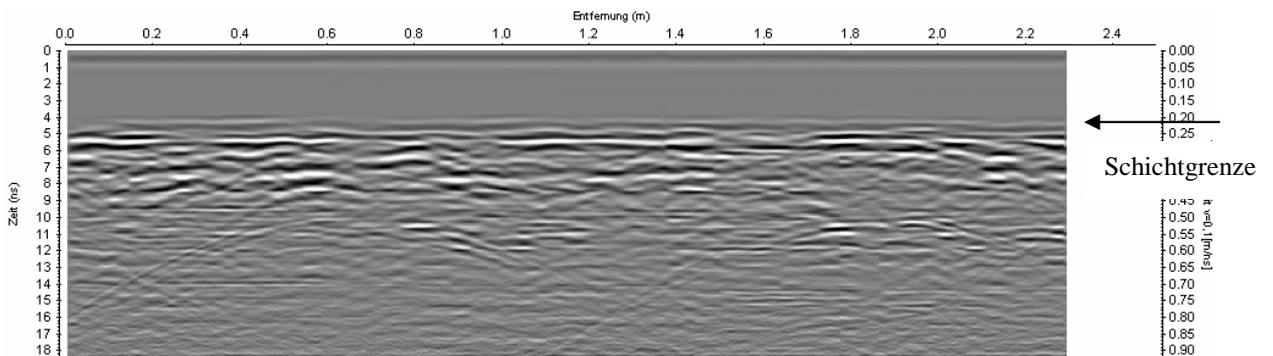


Abb. 3.6: Radargramm der obersten Treppenstufe im Durchgangsbereich

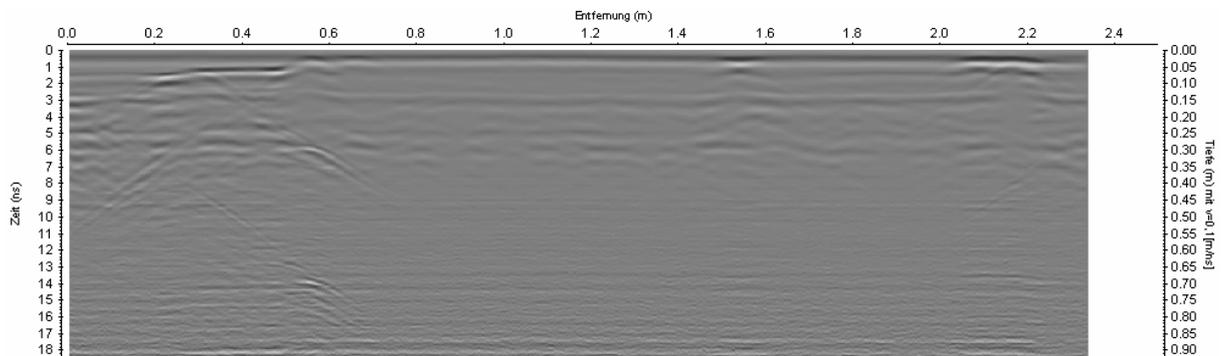


Abb. 3.7: Radargramm auf dem Gehhorizont im Durchgangsbereich

Dahingehend bietet der Gehhorizont im Durchgangsbereich ein völlig anderes Bild: hier scheint ein quasi homogener Aufbau vorzuliegen, ohne größere Änderungen in den Materialeigenschaften.

#### 4. Ausblick

Das Georadar liefert auch bei dieser Art der Anwendung / Fragestellung gute Ergebnisse bezüglich unterschiedlicher Materialeigenschaften. Keine Probleme bereitet es, das in den Säulen vorhandene Trägergerüst zu erkennen und mit verhältnismäßig geringem Aufwand in seiner dreidimensionalen Lage bezüglich der Säulenoberfläche zu kartieren. Sofern eine exakte Vermessung der Säulen / des Tores als Kartiergrundlage zur Verfügung steht, kann selbstverständlich auch diese als Referenz gewählt werden.

Schichtgrenzen - insbesondere zwischen so physikalisch unterschiedlichen Materialien wie Marmor, (Kalk?)Mörtel und Ziegel - können sicher und schnell erfasst werden, Fehlstellen und frühere Restaurierungsarbeiten werden erkannt.

Insbesondere im Hinblick auf eine Restaurierungsmaßnahme des Markttores stellt sich die Frage, ob nicht im Vorfeld alle zur Verfügung stehenden Informationsquellen genutzt werden sollten, um mehr über den eigentlichen Aufbau zu erfahren. Hier bietet sich eine großflächige Radaruntersuchung durchaus an – die Ergebnisse sind vielversprechend.

Oranienburg, 27.Mai 2002

Stefan Kroll  
Dipl. Geophys.



Anlage 15

Radarmessungen an Marmorsäulen.

Marian Hertrich, Jürgen Schmalholz, Ugur Yaramanci,  
TU Berlin



# Radarmessungen an Marmorsäulen

Marian Hertrich, Jürgen Schmalholz, Ugur Yaramanci

## **Abstract**

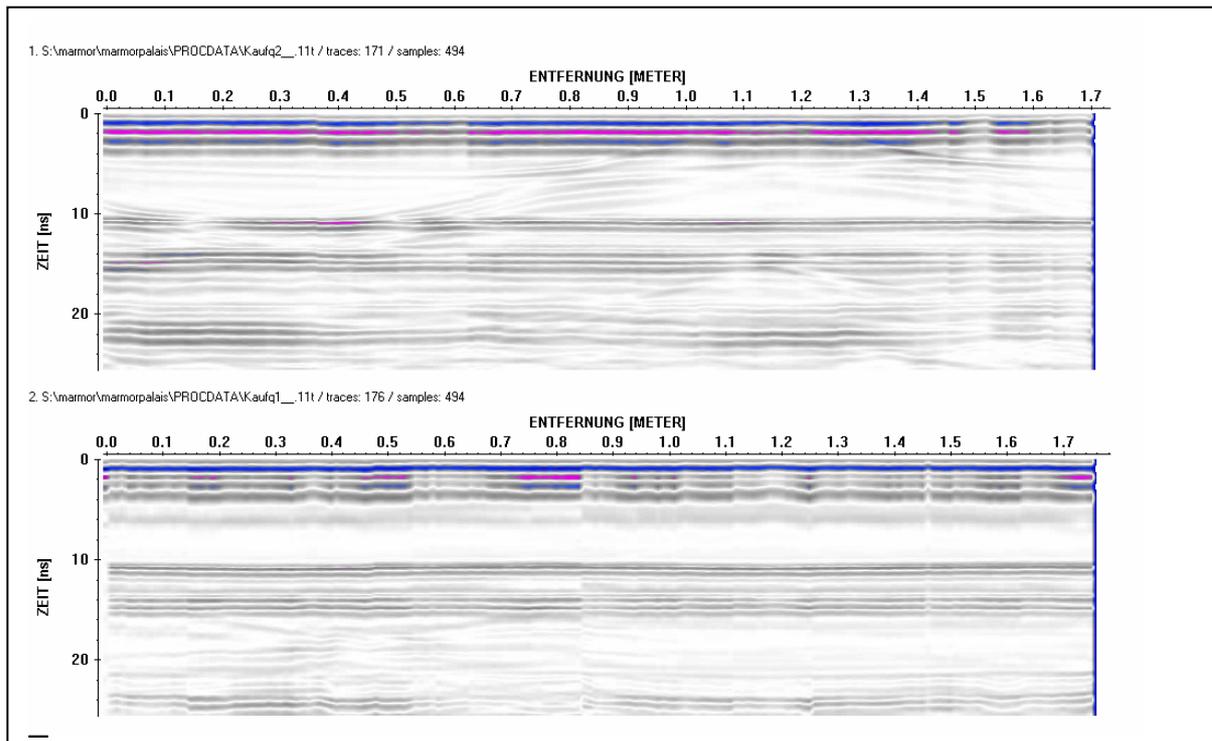
Im Rahmen der Schadensanalyse an Marmorsäulen wurden Georadarmessungen am Marmorpalais in Potsdam und am Tor von Milet im Pergamon-Museum / Berlin durchgeführt. Das Verfahren des Georadars ermöglicht eine Erkundung der Materialbeschaffenheit und des Aufbaus der Säulen. Die Auswertung der reflektierten- und transmittierten Wellen lässt Schlüsse auf die räumliche Verteilung verschiedener Materialien sowie unterschiedliche Schädigungen, wie feuchte Bereiche oder Klüfte, zu. Im Fall der massiven Säulen in Potsdam konnten schwache Reflektoren detektiert und bekannten Strukturen der Säule zugeordnet werden. An den Säulen des Markttors von Milet konnte sowohl die Beschaffenheit des oberflächennahen Materials als auch die Struktur des stählernen Stützgerüsts zufriedenstellend charakterisiert werden. In beiden Fällen waren Messungen mit sehr guter Datenqualität und hoher Auflösung möglich. Eine detaillierte Erkundung mit Reflexions- und Tomographiemessungen ist daher sehr aussichtsreich.

## **Einleitung**

Das Bodenradar (Ground Penetrating Radar, GPR) nutzt die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen im MHz-Bereich zur Erkundung des Untergrundes. Bei diesem Verfahren wird mit einer Sendeantenne eine Welle in den Untergrund abgestrahlt und das Signal an anderer Stelle mit einer Empfangsantenne registriert. Die elektromagnetische Welle wird an Strukturen gebrochen und reflektiert, welche Unterschiede in den elektrischen Eigenschaften aufweisen. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen wird durch die Polarisierbarkeit des Mediums bestimmt, die elektrische Leitfähigkeit bestimmt die Dämpfung der Welle. Registriert wird die Laufzeit der Signale durch den Untergrund entlang eines Profils; bei bekannter Geschwindigkeit erhält man so Informationen über die räumliche Lage von reflektierenden Strukturen sowie Änderungen der Ausbreitungseigenschaften nahe der Oberfläche durch die direkte Welle. Während die meisten Geomaterialien geringe Unterschiede in der Polarisierbarkeit ausweisen, stellen sowohl Wasser als auch Luft starke Kontraste dar. Die Porosität und die Art der Porenfüllung bestimmt also sehr stark die elektromagnetische Wellenausbreitung und damit die Reflektionseigenschaften.

## **Typ Marmorpalais**

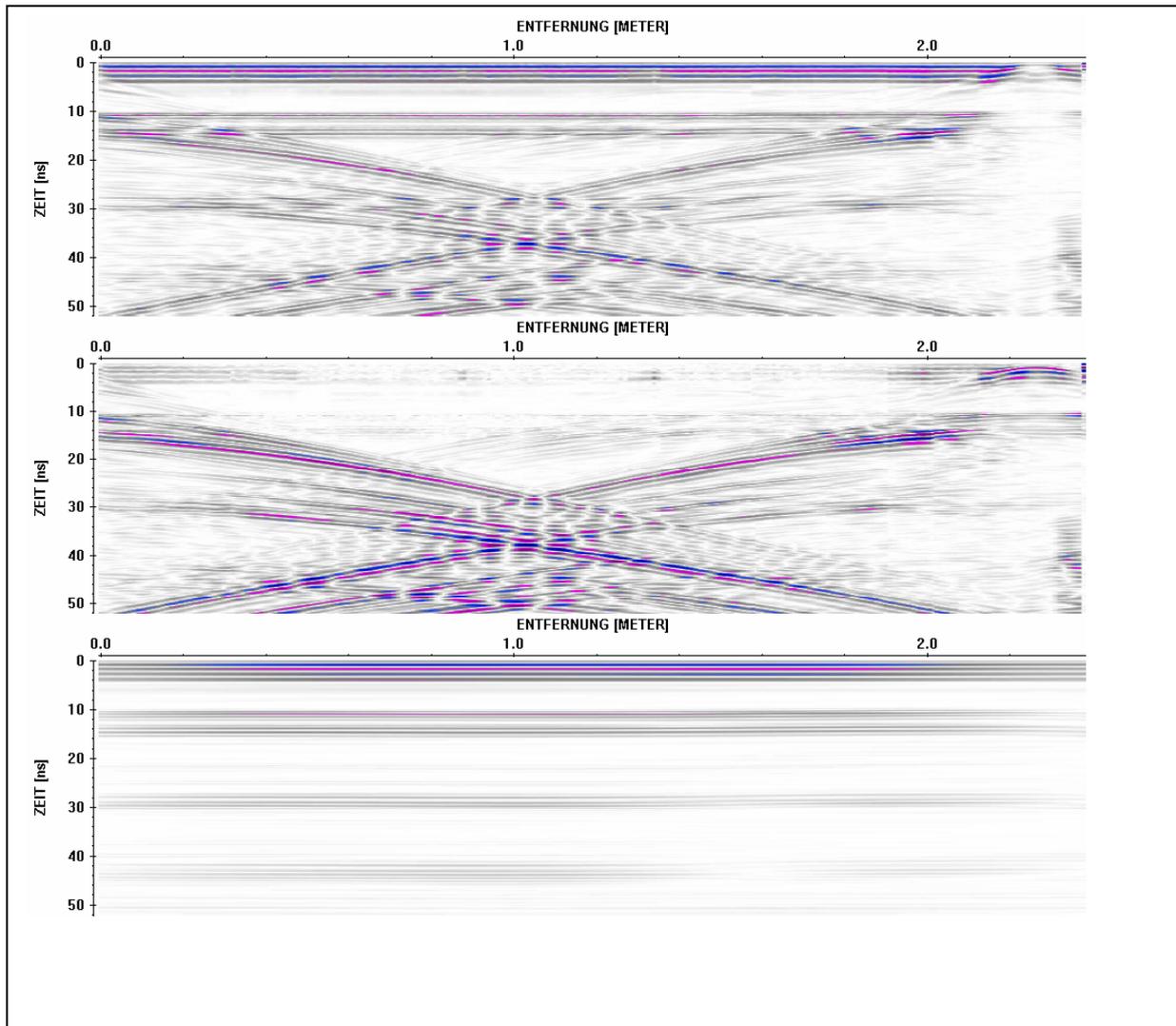
Die Säulen am Marmorpalais in Potsdam bestehen aus homogenem Marmor und haben einen Durchmesser von etwa 50 cm. Die im Radargramm 1a & 1b erkennbaren Reflexionen stammen von Strahlen verschiedener Laufwege. Der erste Einsatz bei ca. 10 ns kann der Reflexion an der Gegenseite der Antenne zugeordnet werden. Aber auch Strahlen, die zwei und mehr mal reflektiert wurden, sind zu wenig späteren Zeiten zu erkennen. Die Laufwegunterschiede der einzelnen Strahlen werden mit der Anzahl der Reflexionen geringer und die entsprechenden Wellenzüge laufen ineinander. Durch die guten Ankopplungs- und Reflektionseigenschaften der Säulenoberfläche sowie die geringe Dämpfung können auch noch die Multiplen der Reflexionen bei 20-25 bzw. 30-35 ns deutlich erkannt werden. In Abb. 1c zeigt eine Sektion von der Basis der Säule bis zur Firste. Auch hier sind die Einsätze der Reflexionen und deren



Multiplen über das gesamte Radargramm erkennbar. Zusätzlich erkennt man hier die Amplitudenstarken Kantendiffraktionen von der Basis bzw. der Firste der Säule. Der Laufweg der refraktierten Wellen nimmt mit zunehmendem Abstand vom Säuleneende nach einem einfachen Potenzgesetz zu. Diese registrierten Signale verlaufen als Hyperbeln jeweils zu den Enden der Säule, für jeden Strahl beliebiger Anzahl von Reflexionen und Ordnung.

Die Messungen wurden in einer Sektion vertikal von der Basis zur Firste durchgeführt, sowie in zwei Schnitten horizontal. Die Horizontalschnitte orientierten sich an den Lokationen der anderen Verfahren, eines im Bereich des Risses sowie eines etwa 50 cm darunter.

Die horizontalen Schnitte zeigen deutlich die Einsätze der Reflektierten Wellen und der Multiplen. Die Sektion unterhalb des Risses zeigt keine weiteren Hinweise auf die innere Struktur der Säule. Die Sektion im Bereich des Risses dagegen zeigt zwischen den Einsätzen der direkten Welle und der ersten Reflexion eine Struktur, die in etwa sinusartig über das gesamte Profil verläuft. Diese Reflexion kann einem Reflektor zugeordnet werden, der im Bereich des Risses oberflächennah liegt. Der vertikale Schnitt von der Basis bis zur Firste der Säule zeigt in der unbearbeiteten Darstellung (Fig 2a) bereits die wesentlichen Reflexionen, die bereits erklärt wurden. Durch eine  $f_k$ -Filterung lassen sich die Reflexionen der horizontalen Strukturen und die gekrümmten Verläufe der Kantendiffraktionen sehr effektiv trennen. Die herausgefilterten horizontalen Strukturen sind somit wesentlich besser zu interpretieren. Es zeigt sich, dass die Einsätze der direkten Reflexion und der ersten Reflexion höherer Ordnung absolut eben verlaufen und nur geringe Amplitudenvariationen entlang der Sektion aufweisen. Die ersten Multiplen bei ca. sowie die 2. Multiplen bei ca. 45 ns zeigen jedoch eine deutliche Änderung der Amplitude und eine leichte Verschiebung der Ersteinsatzzeit ab ca. 1.2m Höhe. Dies kann durch einen Bereich höherer Feuchte erklärt werden, der zu höherer Dämpfung und höherer Ausbreitungsgeschwindigkeit führt. Dieser Bereich liegt im Bereich des Risses und kann daher damit in Verbindung gebracht werden. Die herausgefilterten



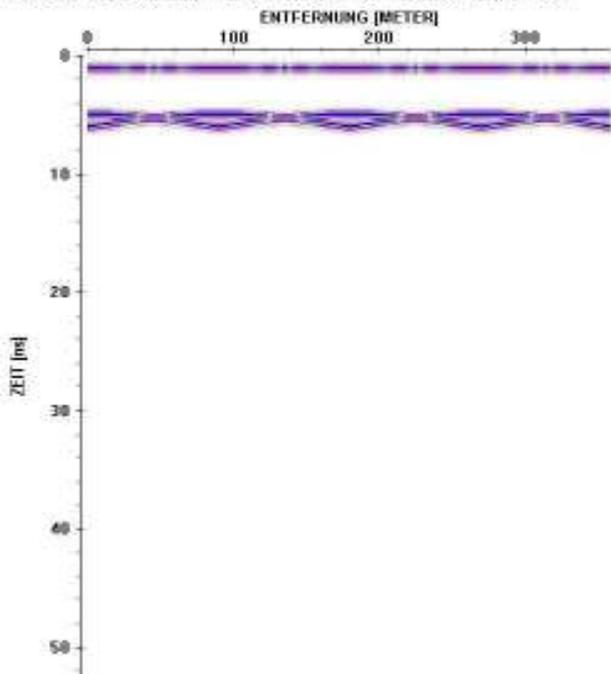
gekrümmten Strukturen zeigen die Kantendiffraktionen mehrerer Ordnungen und deren Multiple. Zusätzlich kann aber eine hyperbelartige Reflexion mit einem Apex bei ca. 1.25m deutlich hervorgehoben werden. Auch diese kann dem Bereich um den Riss zugeordnet werden. Die Messungen an den homogenen Marmorsäulen des Marmorpalais lassen durch geeignete Messung und Bearbeitung Rückschlüsse auf den Zustand des Inneren der Säule zu. Eine reflektierende Struktur konnte in den Radargrammen deutlich erkannt und im Bereich des Risses zugeordnet werden. Hinweise auf veränderte Materialeigenschaften oder Feuchtegehalte wurden ebenfalls im Bereich des Risses lokalisiert und können gegebenenfalls mit Referenzmessungen genauer bestimmt werden.

### ***Typ ‚Milet‘***

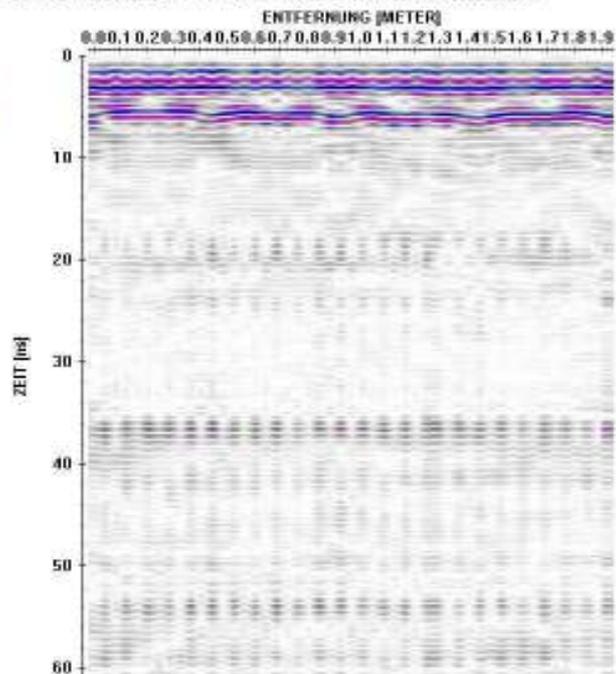
Die untersuchten Säulen am Tor von Milet sind nicht mehr im Originalzustand, sondern wurden bei der Rekonstruktion im inneren Entkernt und auf ein Stahlskelett aufgezogen. Der verbliebene Ringraum wurde mit unbekanntem Material aufgefüllt und danach zementiert. Die Säulenoberfläche ist nicht glatt, sondern kanneliert. Dadurch ist keine einheitliche Ankopplung der Antenne an die Säule möglich, reflektierte werden stark verzerrt. Die x-förmige Stahlverstrebung in der Säule wirkt

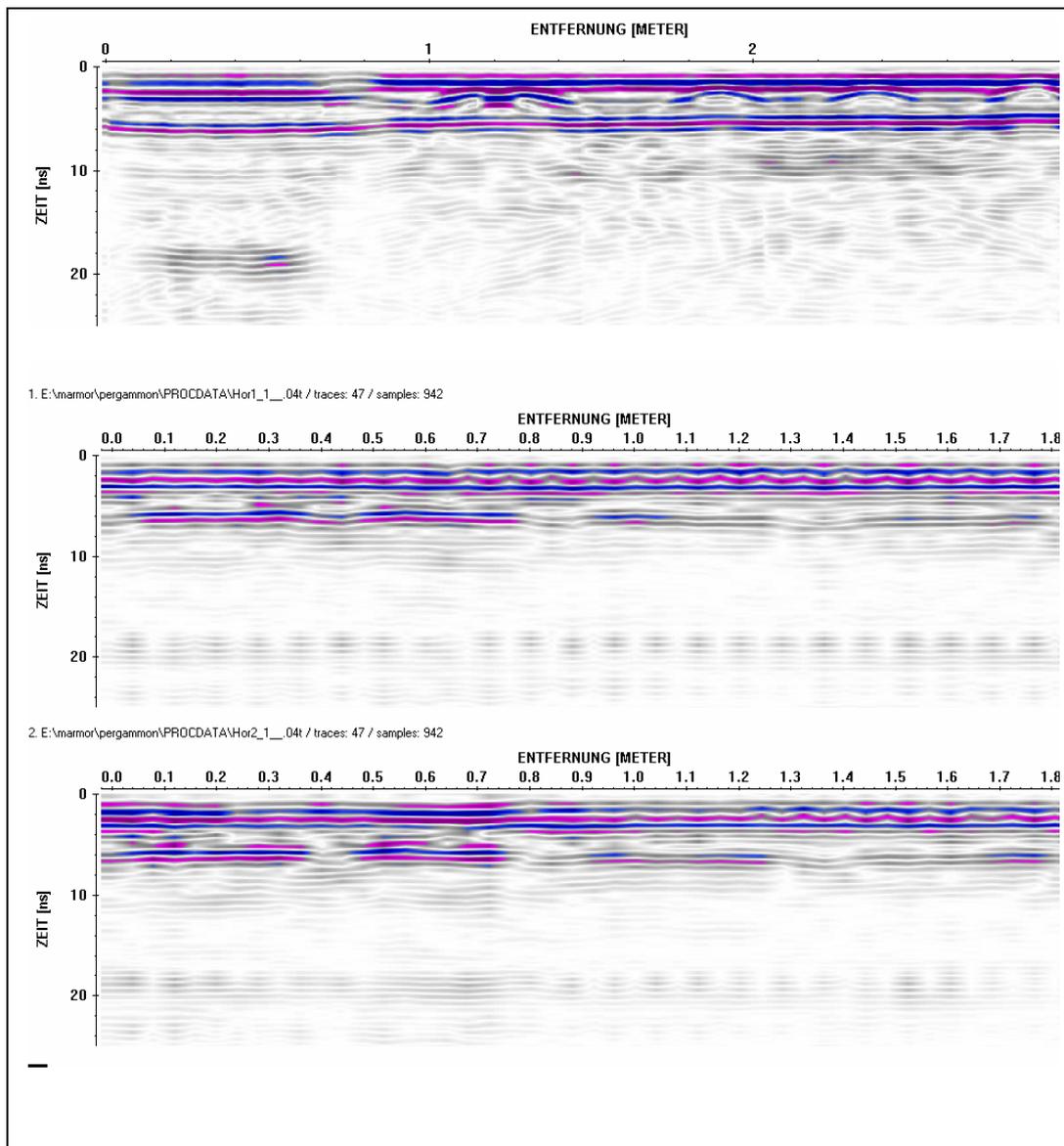
als idealer Reflektor für die Radarwelle. Da die erkennbaren ersten Einsätze immer vom räumlich nächsten reflektierenden Objekt kommen, erhält man nacheinander von allen vier Ecken des x-förmigen Trägers Reflexionen. Die Verlauf der Ersteinsätze im Radarogramm ist relativ flach, die Laufzeiten zum nächsten reflektierenden Punkt ändern sich nur geringfügig. Der Laufweg ist bei der gegebenen Geometrie der Säule gerade so groß, dass der reflektierte Wellenzug getrennt erkennbar ist. Eine Gegenüberstellung der modellierten Effekte unter den Gegebenheiten an diesen Säulen und einer realen Messung ist in Abb. 2a+b. gezeigt. Auch in diesem Radarogramm sind Reflexionen höherer Ordnung – die also nicht durch den Träger hindurchgehen- bei etwa 18ns und 36ns zu erkennen, wegen der unebenen Oberfläche sind diese jedoch sehr unscharf. Der verbliebenen Rand der Säule beträgt nur einige Zentimeter. Die Eindringtiefe der direkten Welle zwischen Sende- und Empfangsantenne liegt ebenfalls in diesem Bereich, bzw. ist etwas größer einzuschätzen. Daher sollte die Form des Wavelets der direkten Wellen nicht nur vom Säulenrand, sondern auch vom unterliegenden Material abhängen, sofern dieses sich in seinen elektrischen Eigenschaften vom Marmor unterscheidet. Das Radarogramm in Abb. 3a zeigt einen Vertikalschnitt von der Basis zur Firste einer Säule, die nur im unteren Teil aus originalem Marmor besteht, im oberen Teil jedoch mit Ersatzmaterialien ausgebessert wurde. Man erkennt deutlich den Verlauf der direkten Welle bis ca. 3.5ns, der an einigen Stellen durch hyperbelartige Strukturen gestört wird. Diese Bereiche bei 1.2m, 1.9m 2.4m und 2.8m deutet auf Verankerungen hin, die bis kurz unter die Oberfläche reichen müssen. Weiterhin ist die Reflexion durch den Stahlträger bei ca. 6ns über die gesamte Länge zu erkennen. Die Laufzeit nimmt zur Firste der Säule leicht ab, da die Säule etwas konisch ist. Interessant ist der Verlauf der Reflexionen unterhalb von 0.9m. In diesem Bereich ist das Wavelet der direkten Welle breiter als im oberen Abschnitt. Im selben Bereich ist die Reflexion des Stahlträgers etwas zu späteren Zeiten verschoben. Da man davon ausgehen kann, dass der Träger gerade ist, muss hier die Ausbreitungsgeschwindigkeit kleiner sein als im oberen Bereich. Das breitere Wavelet der direkten Welle deutet ebenfalls auf

1. D:\Mater\marmor\pegannon\PRODDATA\SEK\_N\_DW.DAT / traces: 260 / complex: 1054



2. D:\Mater\marmor\pegannon\PRODDATA\Hr1\_2\_03 / traces: 49 / complex: 995





kleinere Ausbreitungsgeschwindigkeiten hin. Die beiden unteren Abbildungen zeigen Horizontalschnitte bei 1.6m und 0.6m. Im Bereich der Säulenoberfläche vollständig aus Ersatzmaterial. Der Verlauf der direkten Welle ist einheitlich und zeigt keine Variation entlang der Sektion. Der Verlauf der Reflexion des Trägers ist nicht ganz einheitlich. Im rechten Teil des Bildes ist die Laufzeit etwas größer als im linken Teil, die Amplituden sind etwas schwächer. Die Ursache hierfür liegt entweder darin, dass der Träger nicht exakt in der Mitte der Säule zentriert ist, oder die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwelle ändert sich im Verlauf der Sektion. Ursachen können neben veränderten Materialeigenschaften unterschiedliche Feuchtegrade sein, da diese die Ausbreitungsgeschwindigkeit besonders sensibel beeinflussen. Im unteren Radargramm bei 0.6m ist die Waveletform der direkten Welle nicht einheitlich. Dies deckt sich mit den Beobachtungen an der Säulenoberfläche, die in dieser Höhe an mehreren Stellen ausgebessert wurde. Auch hier ist die Reflexion des Trägers im gleichen Bereich verschoben und gedämpft.

## ***Ausblick***

Die Messungen mit dem Georadar an Marmorsäulen waren sehr erfolgreich. In den vorliegenden Fällen reichte das Auflösungsvermögen mit der 1GHz-Antenne aus um Strukturen und Materialeigenschaften im Säuleninneren zu detektieren und mit den vorliegenden Erkenntnissen in Übereinstimmung zu bringen.

## Anlage 16

Elektrische Widerstandstomographie zur  
Zustandsbewertung von Bauwerken - Ergebnisse von  
Messungen im Pergamonmuseum.

Just, A., Danckwardt, E., Jacobs, F., Universität Leipzig



Just, A., Danckwardt, E., Jacobs, F. (Leipzig)

## **Elektrische Widerstandstomographie zur Zustandsbewertung von Bauwerken - Ergebnisse von Messungen im Pergamonmuseum**

Email: [ajust@rz.uni-leipzig.de](mailto:ajust@rz.uni-leipzig.de)

Der zerstörungsfreien Prüfung von Baudenkmalern kommt große Bedeutung zu, da möglichst detaillierte Informationen über den Zustand des Kulturgutes bei möglichst wenig Verlust an wertvoller Bausubstanz und vollständiger Erhaltung der Oberfläche gewünscht sind.

Zur Lösung dieser Aufgabe werden auch aus der Geophysik bekannte physikalische Verfahren herangezogen (z.B. NIEDERLEITHINGER et al. 2002).

Prinzipiell geeignet zur Untersuchung insbesondere zylindrischer Säulen ist die spezielle Form der Elektrischen Widerstandstomographie (2D), die an der Universität Leipzig zur Untersuchung zylinderförmiger Objekte wie Bohrkernen und zylindrischer Gefäße mit Lockersedimenten entwickelt wurde und auch erfolgreich zur Untersuchung von Baumstämmen angewendet wird (JUST 2002).

Beispielhaft wurden Messungen am Tor von Milet im Pergamonmuseum Berlin durchgeführt. Die Säulen des Tores bestanden ursprünglich aus Marmor. Im Zuge der Aufstellung der zu Beginn des 20. Jahrhunderts in Milet (Türkei) ausgegrabenen Teile des Tores im Pergamonmuseum wurden die erhaltenen Säulensegmente ausgebohrt, innen mit Beton aufgefüllt und mit Stahlträgern versehen. Fehlende Säulensegmente wurden durch Betonsegmente, teils mit Ziegelementen abwechselnd, ersetzt.

Zur Messung des komplexen elektrischen Widerstandes (Betrag und Phase) im Frequenzbereich 366 mHz bis 12 kHz wurde die Apparatur *SIP Fuchs Kompakt*

von Radic Research Berlin genutzt. Als Elektroden kamen medizinische Elektroden, wie sie zur Reizstrombehandlung verwendet werden, zum Einsatz. Diese mit einem Leitgel versehenen Elektroden werden auf die Oberfläche des zu untersuchenden Objektes geklebt (Abb.1).

Die Widerstandsmessungen wurden an zwei Segmenten einer Säule durchgeführt, deren unteres Segment außen aus Original-Marmor besteht, während das obere Segment komplett aus Ersatzmaterial ist. Die ermittelten Widerstandsverteilungen der beiden Segmente (Abb. 2, Widerstandstomogramme bei einer Frequenz von 1.46 Hz) unterscheiden sich signifikant: Während in der unteren Ebene sehr hohe spezifische elektrische Widerstände ( $10^8$  bis zu  $10^{10} \Omega\text{m}$ , Marmor, Hohlräume im darunterliegenden Beton ?) auftreten, liegen die Werte oben bei maximal  $10^6$  bis  $10^7 \Omega\text{m}$  (trockener Beton). Im unteren Tomogramm erkennt man ein deutliches Widerstandsminimum ( $< 10^4 \Omega\text{m}$ ) im Zentrum, das dem Stahlträger im Inneren zugeordnet werden kann. Das obere Tomogramm weist ein kreisförmiges Widerstandsminimum ( $10^5 \Omega\text{m}$ ) auf, das auf eine zusätzliche ringförmige Bewehrung des Betonsegmentes hindeutet. Durch die quasi abschirmende Wirkung dieser Bewehrung wird der zweifelsfrei auch hier vorhandene Stahlträger im Zentrum nicht mehr aufgelöst. Der Stahlträger wurde durch Ultraschallmessungen (Universität Göttingen) und durch Radarmessungen (TU Berlin) nachgewiesen. Das Radar erbrachte auch Indikationen auf Bewehrungsringe im oberen Segment.

Referenzen:

NIEDERLEITHINGER, E., MAIERHOFER, CH., KRAUSE, M., WERITZ, F., GARDEL, A. (2002): Zerstörungsfreie Bauwerksdiagnose.- 62. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft, 3.-8.3.2002, Hannover.

JUST, A.(2002): Bestimmung der räumlichen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes an zylinderförmigen Körpern mit Hilfe der Elektrischen Widerstandstomographie - Anwendung in der Petrophysik auf Bohrkerne und Lockersedimente.- Dissertation, Universität Leipzig 2001 und Shaker Verlag Aachen 2002, ISBN 3-8265-9894-6.

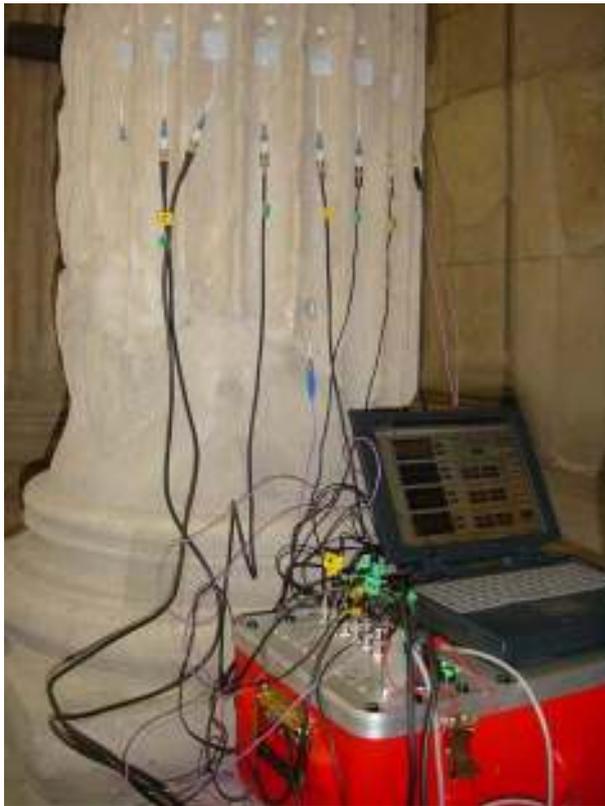
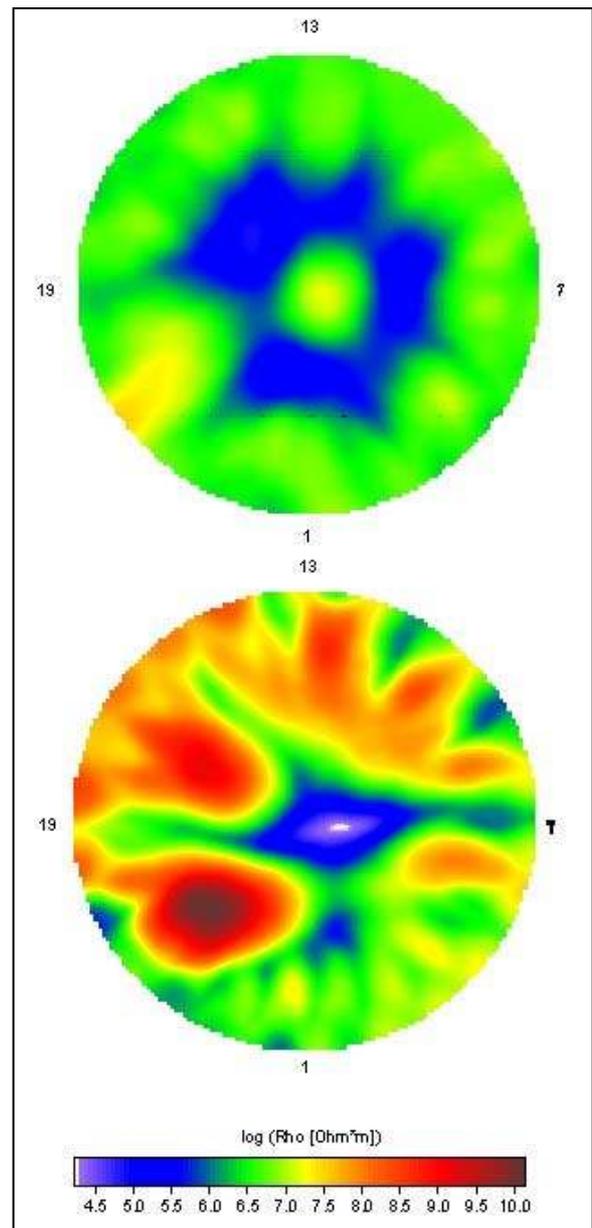


Abb. 1: Meßaufbau zur Elektrischen Widerstandstomographie mit der Apparatur *SIP Fuchs Kompakt* an einer Säule am Tor von Milet.

Abb. 2: Widerstandstomogramme (Frequenz 1.46 Hz) in zwei Ebenen der Säule.  
Oben: Ersatzmaterial mit vermuteter zusätzlicher Bewehrung;  
Unten: Originalmarmor außen, Beton innen.  
Im Zentrum der Säule befindet sich ein Stahlträger.



## Anlage 17

Construction physics of the Market Gate of Miletus  
discoverd by non-destructive tools.

Ruedrich, J., Hertrich, M., Just, A., Siegesmund, S.,  
Yaramanci U. & Jacobs, F.



# CONSTRUCTION PHYSICS OF THE MARKET GATE OF MILETUS DISCOVERED BY NON-DESTRUCTIVE TOOLS

Joerg Ruedrich\*

Geoscience Centre, University of Göttingen, Goldschmidtstrasse 3, 37077 Göttingen,  
Germany

Marian Hertrich

Dept. of Applied Geophysics, Technical University Berlin, Ackerstrasse 71-77, 13355  
Berlin, Germany

Anita Just

Institute of Geophysics and Geology, University of Leipzig, Talstrasse 35, 04103 Leipzig,  
Germany

Siegfried Siegesmund

Geoscience Centre, University of Göttingen, Goldschmidtstrasse 3, 37077 Göttingen,  
Germany

Ugur Yaramanci

Dept. of Applied Geophysics, Technical University Berlin, Ackerstrasse 71-77, 13355  
Berlin, Germany

Franz Jacobs

Institute of Geophysics and Geology, University of Leipzig, Talstrasse 35, 04103 Leipzig,  
Germany

## **Abstract**

A comprehensive study of high resolution geophysical methods has been conducted at the Market Gate of Miletus at the Pergamon Museum in Berlin. The Market Gate was reconstructed from fragments of the original marble material mounted on a steel skeleton and partially replaced by substitute material copies. Non-destructive methods of ultrasonic tomography, electrical resistivity tomography and ground penetrating radar have been applied to evaluate the ability to render the internal structure of the reconstructed marble columns, the state of preservation and characterisation of original and different types of substitute material. Tomographic results of ultrasonic and electrical measurements clearly show a zone of significant lower velocities and resistivities. In spite of the small scale of structures, radar measurements can render the location and orientation of the steel core and give additional information on material changes of surface materials casing and mortar fillings. We show that a combination of these geophysical techniques allows a detailed investigation of the columns interior to reliably evaluate construction physics, state of preservation and material properties from non-destructive methods.

**Keywords:** ultrasonic tomography, electrical resistivity tomography, ground penetrating radar

## **1 Introduction**

The Market Gate of Miletus at the Pergamon Museum represents a magnificent, two stored marble facade, which combines Hellenistic and Roman architectural styles (see

\*Author to whom correspondence should be addressed.

Fig. 1a). The Market Gate was reconstructed between 1925-1929 in such a way that most of the 750 t fragments were removed leaving 3-4 cm thick cored marble pieces. The fragments were probably mounted on a steel frame and filled with different mortars. An assumed configuration of the different materials is given in Fig. 1b. However the detailed reconstruction plans are missing due to the war-damages.

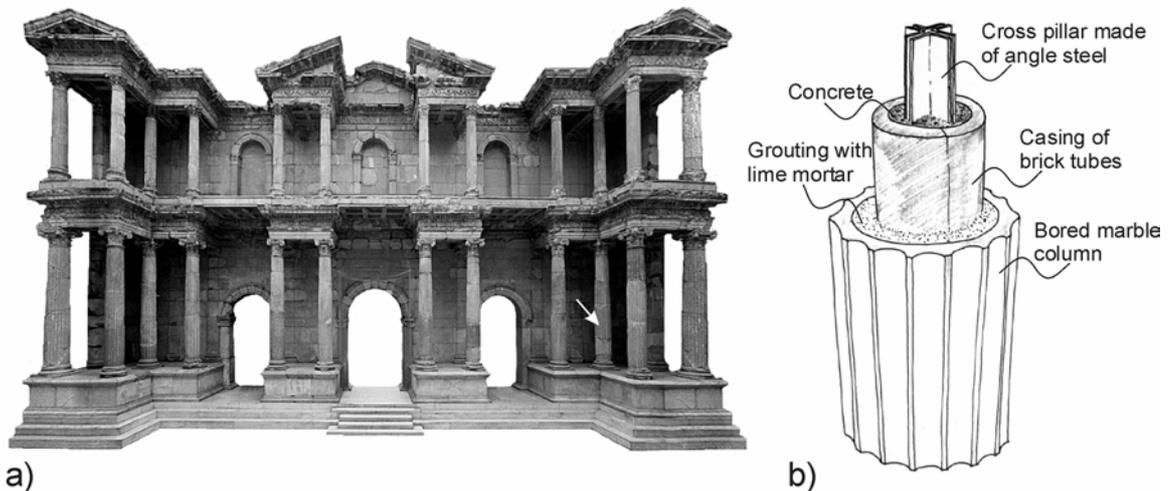


Figure 1: (a) The Market Gate of Miletus of the Pergamon Museum in Berlin (the white arrow marks the investigated column) and (b) schematic sketch of the assumed steel mortar construction of a column (after Dr. Pfanner).

As a testing area reconstructed columns of marble and those which were replaced with copies made of building materials based on portland cement has been studied. In order to gain more information about the construction physics we combined results of different non-destructive testing tools: ultrasonic tomography, electrical resistivity tomography and ground penetrating radar.

## 2 Ultrasonic tomography

Ultrasonic methods are a very efficient, quick and non-destructive tool for the evaluation of construction physics and the state of preservation. The principle of ultrasonic method is the propagation of elastic waves through solid media. Velocity and the modification of the input signal can be used to characterise different materials and internal structures. The fact that the soundness of rock's and building materials is mainly influenced by the porosity and the pore shapes make it to an efficient tool for investigations of the state of weathering in preservation of monuments and historical buildings (c.f. WEISS et al. 2000). In contrast to the conventionally used simple evaluation of compressional wave velocities ( $V_p$ ) we applied the ultrasonic tomography on the marble column.

The ultrasonic investigations have been carried out with P-wave (350 kHz) transmitter and receivers. An array of one transmitter and eleven receivers was mounted along the horizontal circumference of the column. During each measuring cycle a sector of  $143^\circ$  was covered (Fig. 2a). For a better distribution an unsymmetrical orientation of ray path was chosen. An almost complete coverage was obtained by moving this configuration twelve times (see Fig. 2b). Then, a 2D-velocity distribution based on the ray paths indicated in Fig. 2b was computed by a tomographic wavefront migration (see JACKSON & TWEETON 1994).

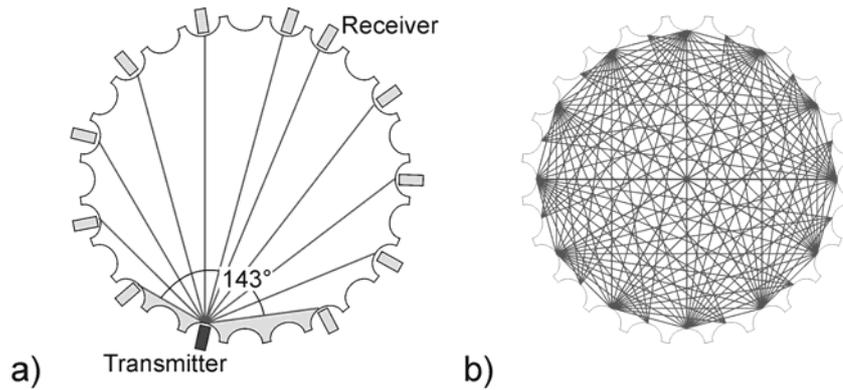


Figure 2: Sketch of the transmitter and receiver positions used for the tomography: (a) an array with one transmitter and eleven receiver positions and (b) the total coverage obtained by moving the ray path configuration.

The obtained velocity distribution (Fig. 3a) shows a more or less concentric pattern. Velocities of around 5.2 km/s are localised in the outer rim, while slower velocities of around 4.4 km/s belong to the central section. By comparing the velocity distribution of the tomographic inversion and the assumed configuration of the different materials, it is evident that the higher velocities correlates with the marble in the outer part of the column (Fig. 3b). The interpreted values correlate excellent with laboratory measurements on marble samples of the Market Gate. The samples are mostly slight weathered and show ultrasonic wave velocities of around 5.0 km/s. These results are in good agreement with literature values of 7.0 km/s for fresh down to 1.0 km/s for strongly deteriorated marbles (cf. WEISS et al. 2000).

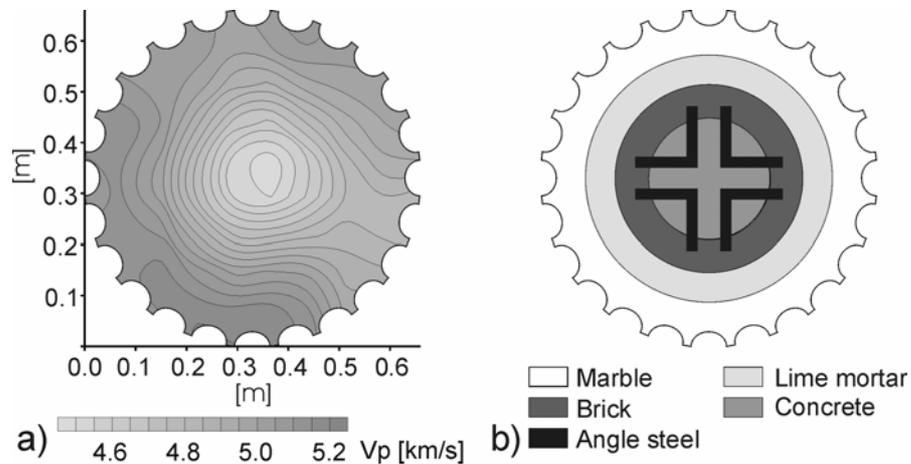


Figure 3: (a) 2D tomographic inversion of the investigated column and (b) assumed construction of the column in the horizontal section.

For lime mortar and concrete lower compressional wave velocities in the range between 3.0 km/s and 4.5 km/s can be assumed. Bricks normally show very low  $V_p$  between 1.5 km/s and 3.5 km/s due to its high porosity, whereas steel achieves values at approximately 6.0 km/s. The relatively low velocities of 4.4 km/s in the central part of the tomographic inversion probably represent a velocity mixture of the different materials and can be attributed to the complex geometry of the core made of angle steel, concrete and brick. The expected high velocities of the steel core are not reflected by the tomographic inversion. This point out, that there is no elastic bonding between the mortar and the steel.

### 3 Electrical resistivity tomography

Electrical resistivity tomography is used to determine the spatial distribution of electrical resistivity. Depending on porosity, water content, resistivity of the pore fluid and matrix properties (esp. clay content) of the building material, it yields information about these quantities. Metal constructions inside of a building have a great influence to the resistivity distribution because of their high electrical conductivity. The tomographic method for the investigation of cylindrical objects uses an array of two dipoles A-B and M-N on the circumference (see Fig. 4). Current is injected at the source dipole A-B and the potential difference is measured by the potential dipole M-N at several positions. From the current through A and B, the potential difference between M-N and a geometrical factor which is calculated after Weidelt & Weller (1997) the apparent resistivity is calculated for each configuration.

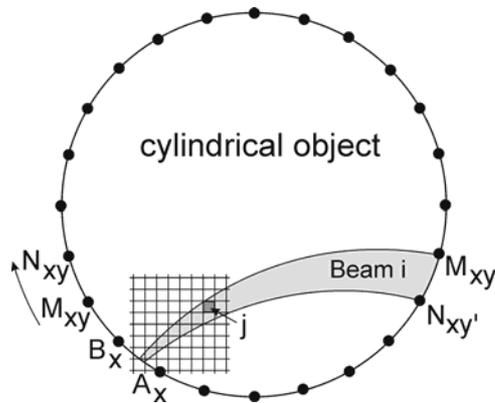


Figure 4: The principle of tomographic measurement. A-B source dipole, M-N potential dipoles.

In order to obtain the spatial distribution of true resistivities by applying a tomographic reconstruction algorithm a great number of measurements with different configurations of the dipoles is necessary in a measurement plane. The electrode array at the column consisted of 24 electrodes, so 24 different current dipoles with 21 potential dipoles each finally leads to 504 possible individual measurements. The tomographic analysis applied here is based on the Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (SIRT, Dines and Lytle 1979). It uses a backprojection based on so called “beams” and a forward modelling by 2D finite differences based on Weller (1986). The principles of measurement and tomographic reconstruction are given in detail in Just et al. (1998) and Just (2002).

Resistivity measurements (magnitude and phase, frequency range from 366 mHz up to 12 kHz) at one column of the gate of Miletus were carried out with the apparatus *SIP Fuchs Kompakt* (Radic Research, Berlin/Germany). As electrodes, 24 medical electrodes for current stimulation therapy were used for each measuring plane. This electrodes consisting of a conductive gel were bond to the surface of the column (see Fig. 5a). The first measuring plane is located in the upper segment of the column, which consists completely of replacement material. The second plane is at the lower segment, consisting of original marble at outer areas and replacement material at inner areas.

The resistivity distributions of the two segments (Fig. 5b, resistivity tomograms at frequency 1.46 Hz) are quite different: resistivities in the lower segment are very high with values between  $10^8$  and  $10^{10}$   $\Omega\text{m}$ . They are suspected to be related with marble or cavities in the mortar. In the upper plane, resistivities reach values of  $10^6$  to  $10^7$   $\Omega\text{m}$  at maximum, which is typical for dry concrete. In the lower plane, a significant minimum ( $<10^4$   $\Omega\text{m}$ ) is obtained, which is clearly connected to a steel beam inside the column. The true resistivity of metallic construction materials (about  $10^{-7}$   $\Omega\text{m}$ ) is not reached, because

the resolution of the tomographic method especially in the centre is not high enough for that and gives a medium value of the beam and the surrounding material.

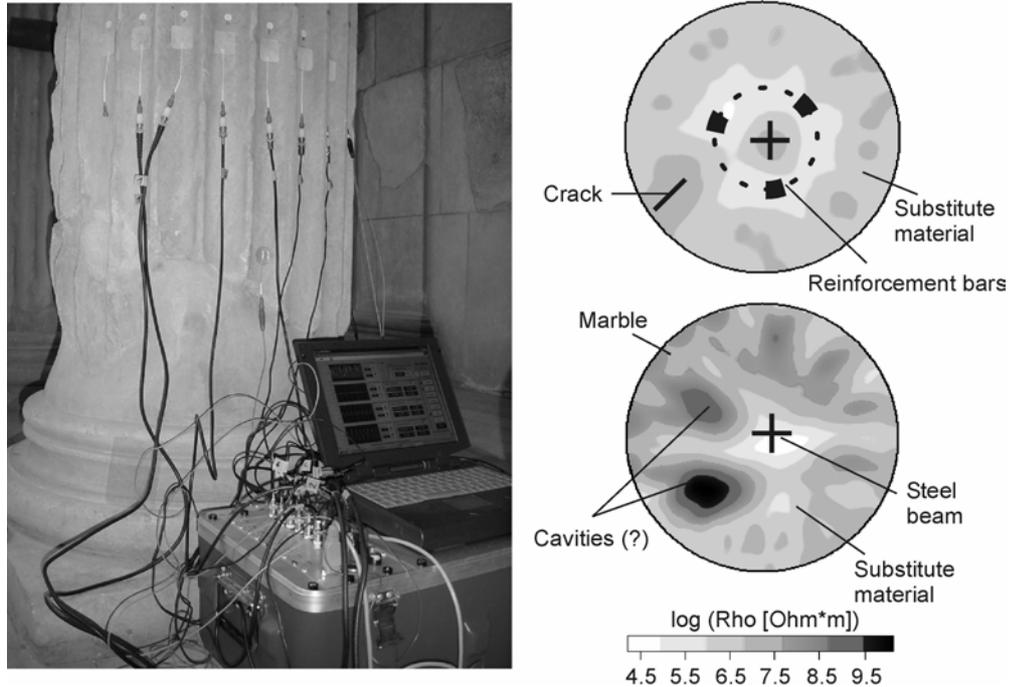


Figure 5: (a) Measurement configuration at the column. (b) Resistivity tomograms (frequency 1.46 Hz) in two planes of the column. Top: replacement material with suspected additional reinforcement. Bottom: original marble at outer areas, replacement material at inner areas. A steel beam exists in the centre of the column, which causes a resistivity minimum in the lower measuring plane, but is blocked from sight in the upper plane by the additional reinforcement.

The upper tomogram shows a circular minimum of about  $10^5 \Omega\text{m}$ . This minimum may be caused by an additional reinforcement (circular arranged vertical bars), whose end rings are visible in radar measurements also. Because of the blocking effect of this reinforcement, the steel beam in the centre gives no indication in the tomogram. A small resistivity maximum at the left side is caused by a visible crack.

#### 4 Ground Penetrating Radar

The Ground Penetrating Radar technique (GPR) is commonly used for the investigation of geological structures or the detection of buried objects (Davis & Annan 1989). It is based on the principle of the propagation of electromagnetic waves and their transmission and reflection in materials with different electromagnetic properties (Conyers & Goodman 1997). The propagation of radar waves as well as their reflection at boundaries is determined by the dielectric permittivity. Common values for geomaterials are some 4-8, in comparison to air with 1 and water with approximately 80. This high contrast underlines the influence of porosity and pore filling on the propagation of radar waves. The frequency of the system i.e. the wavelength determines the spatial resolution of the structure under investigation. The GPR system consists of a transmitter and a receiver antenna at fixed separation. An electromagnetic wave is transmitted and the response from the subsurface is recorded for a time interval. This record gives a single radar-trace (Fig. 6); a series of traces along a profile then yields a radar section (Fig. 7) which can be interpreted. For a more convenient view, radar sections are plotted in point mode in comparison to wiggle mode for a single trace.

The signals recorded at the receiver are of different origin. The first break of a trace is the wave travelling directly from the transmitter to the receiver along the surface. Shape and amplitude of this wavelet depend on the electrical properties of the subsurface. Waves that are reflected at material boundaries reach the transmitter at later times, depending on the distance of the reflecting object and the propagation velocity of the material.

The application of GPR for investigations of the variable internal structure of such fairly small marble columns with steel core inside needs some special interpretation. Beyond the interpretation of single reflections, the complete radar signal has to be regarded in order to characterize the material changes at or close to the surface. The highest available nominal antenna frequency of 1 GHz still has a wavelength of 0.3 m and therefore a resolution of around 0.075 m. In comparison, the distance to the steel core is approximately 0.2 m, outbreaks in the marble, filled with concrete are directly at the surface.

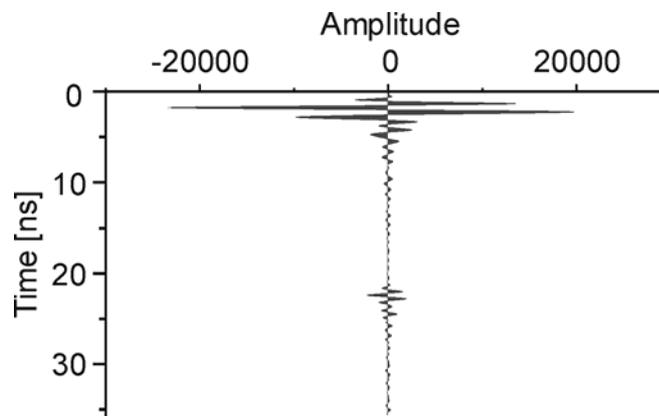


Figure 6: Typical Radar trace of 1 GHz Antenna in air. The large amplitude wavelet at short times is the direct wave. The weaker amplitude wavelet at some 22 ns is the reflection from a steel plate at 1m distance. The direct and reflected waves are clearly separated, but for smaller reflector distances both wavelets interfere.

Profiles have been taken around the column at two different heights and as a section from bottom to top (Fig. 7). The lower section was situated on undisturbed marble surface, the upper one on concrete filling. One can observe clear differences between the two sections on different material. The shape of the direct wave differs significantly. On concrete, the wavelet is shorter with highest amplitude in the first oscillation (I), whereas on marble the wavelet is longer with highest amplitudes in the second phase of the wavelet (II). The undulating reflection horizon in all three radar section between 4 and 8 ns presents the reflection of the cross-shaped steel core (III). Peaks of the smooth undulation are from the tops of the cross, downs from the depression. The position of the core in the column can be derived from the symmetry of this reflector. The lower section additionally shows some diffuse reflections at about 20 ns, which are probably a kind of internal reflections between wall and core. These are not present in the section on concrete (middle). The transition between both structures can be easily followed in the vertical section (top). The change in surface material is at some 0.8 m (IV). The shape of the wavelet changes, and the reflections from the steel core arrive a few parts of a nanosecond later. This is an indication for lower propagation velocities in the original marble material. In the progress of the vertical section we can identify three hyperbolic diffractions (V). Their shape and appearance at very early times points to steel material very close to the surface. These structures are interpreted as reinforcements of the core construction or for the concrete seal.

Ground penetrating radar measurements have been conducted on the marble columns with a very high quality and a surprisingly high information on the internal structure. Even if the layering of the structure is smaller than the spatial resolution of waves at applied frequency, authentic characterization of the internal structure could be derived. Changes in the covering material can be reliably detected, location of the steel core in the column can be determined and additionally reinforcements in the construction are detected with a high spatial resolution.

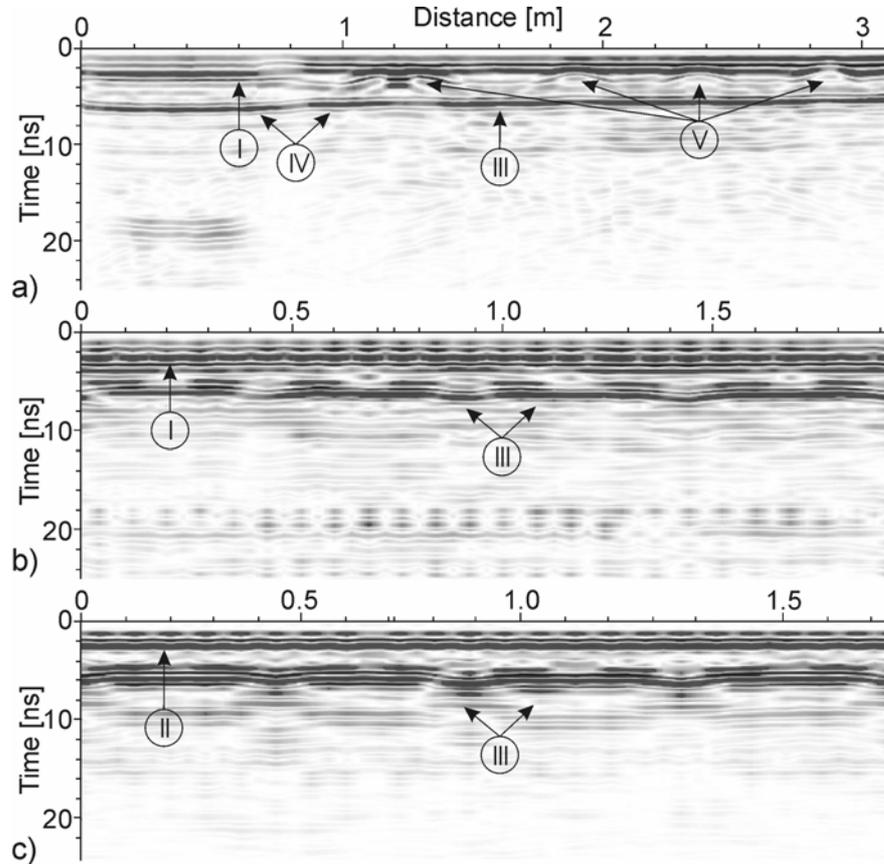


Figure 7: Radar sections at the marble column a) in vertical direction from bottom to top and in horizontal sections around the column b) at around 0.6 m and c) at around 1.60m.

## 5 Conclusions

In the present work we have shown that the application of high resolution geophysical techniques offers powerful tools to investigate the internal structure of archaeological fragments and their state of preservation. The combination of these methods, each sensitive to a different parameter of the material, allows a comprehensive interpretation of material properties.

The ultrasonic tomography is an excellent tool for the determination of different materials and their state of preservation. The investigations have shown, that the weathering condition of the marble can be well detected. This is an important factor for subsequent restoration works at the Market Gate. Lower ultrasonic velocities characterised the parts made of mortar and brick. Thus, also the different materials can be detected by ultrasonic tomography. The steel in the central part of the column is not reflected in the tomographic inversion. This can be attributed to a nonexistent cohesion between the steel and the concrete.

The electrical resistivity tomography provided in a non-destructive way a detailed image of the internal structure of the investigated column. The different materials (original marble and substitute material) emerge as clear resistivity contrasts. Whereas the steel core in the lower measuring plane causes a significant resistivity minimum, additional reinforcements were found in the upper plane, which admittedly shield the steel core. However, the anomaly sizes do not match the real geometrical structures minutely because of the limited resolution of potential tomography.

The Ground Penetrating Radar technique provides sufficient resolution to reliably render the internal structure of the investigated marble columns. Not only the location and orientation of the steel core was detected, also additional reinforcements have been found in the substituted section of the column. Transition between original material and substitute materials was found by analysis of the amplitude and shape of the wavelet of the direct wave and fits well with visual observations. The high data quality and surprisingly high resolution of the method to such a complex structure encourages a tomographic investigation of the columns. Since the contrast of the dielectrical permittivity inside the columns is obviously more significant than electric and acoustic contrasts, a reconstruction of the internal geometry from GRP-tomography is promising.

## **6 Acknowledgements**

We are grateful to V. Kästner from the Staatliche Museen zu Berlin - Preußischer Kulturbesitz for his help by the investigations. Our work was supported by the Deutsche Bundesstiftung Umwelt.

## **7 References**

Conyers, L.B. & Goodman, D., 1997. Ground Penetrating Radar: An Introduction for Archaeologists. Alta Mira Press, London.

Davis, J.L. & Annan, A.P., 1989. Ground Penetrating Radar for high resolution mapping of soil and rock stratigraphy. *Geophys. Prosp.*, 37, 531-551.

Dines, K. A. & Lytle, R. J. (1979): Computerized geophysical tomography, *Proc. IEEE* 67,7, D 1065-1073

Jackson, M.J. & Tweeton, D.R., 1994. MIGRATOM-geophysical tomography using wavefront-migration and fuzzy constraints.- Report of Investigations, U.S.B.M: 35pp.

Just, A., 2002. Bestimmung der räumlichen Verteilung des spezifischen elektrischen Widerstandes an zylinderförmigen Körpern mit Hilfe der Elektrischen Widerstandstomographie - Anwendung in der Petrophysik auf Bohrkerne und Lockersedimente.- PhD Thesis, University Leipzig 2001 and Shaker Verlag Aachen 2002, ISBN 3-8265-9894-6.

Just, A., Küpper, T., Kürschner, D., Kulenkampff, J. & Jacobs, F., 1998. Electrical resistivity tomography for petrophysical investigation.- *Proc. 4<sup>th</sup> EEGS Meeting*, September 1998, Barcelona, 327-330.

Weidelt, P. & Weller, A., 1997. Computation of geoelectrical configuration factors for cylindrical core samples, *Scientific Drilling* 6, 27-34.

Weiss, T., Siegesmund, S. & Rasolofosaon, P., 2000. The relationship between deterioration, fabric, velocity and porosity constrained.- *Proceedings 9<sup>th</sup> International congress on deterioration and conservation of stone*, Volume 1: 215-223; Venice.

Weller, A., 1986. Berechnung geoelektrischer Potentialfelder mit dem Differenzenverfahren, *Freiberger Forschungshefte C 405*, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig.

## Anlage 18

Fotografische Dokumentation und Multispektral-  
Analysen am Markttor von Milet im Pergamon  
Museum, Berlin.

Annette Hornschuch & Jürgen Heckes.



# **Fotografische Dokumentation und Multispektral-Analysen am Markttor von Milet im Pergamon Museum, Berlin**

Untersuchungsbericht  
vorgelegt von  
Annette Hornschuch und Jürgen Heckes



## Inhaltsverzeichnis

Grundlagen .....	3
Motivation .....	3
Multispektrale Aufnahmetechnologie .....	3
Multispektrale Auswertungsmethoden .....	4
Anwendung der Verfahren am Markttor von Milet .....	5
Rahmenbedingungen .....	5
Multispektraler Datensatz .....	5
Beispiele zur multispektralen Auswertung .....	6
Visualisierung der Mörtelschleier .....	6
Aufdeckung von freigelegten Eisenteilen und Roststellen .....	6
Klassifizierung der Marmortypen .....	6
Fazit .....	7
Abbildungen .....	8

## Grundlagen

### **Motivation**

Wert und Anwendbarkeit multispektraler Daten und deren Auswertung sind in der Fernerkundung, insbesondere für die Bestandsaufnahme und –überwachung von Flächenmerkmalen umfassend belegt. Vergleichbare Anwendungen von Fernerkundungstechnologien zur Beschreibung von Bauwerksoberflächen stehen für den Nahbereich noch nicht operationell zur Verfügung. Im Rahmen des von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projektes „Das Markttor von Milet: Schadensanalyse und modellhafte Sanierungskonzepte“ wurde anhand ausgewählter Testflächen das Potenzial von Multispektraldaten und -analysen zur visuellen Schadens- und Zustandserfassung exemplarisch erprobt.

Folgende Auswerteziele standen dabei im Vordergrund:

- Wertneutrale fotografische Abbildung des vorgefundenen Istzustandes zu einem festen Zeitpunkt mit aktuellen Technologien
- Möglichkeiten der Informationsverstärkung oder -unterdrückung zur deutlichen Visualisierung von Phänomenen
- Automatische Gruppierung und Ausweisung von ähnlichen Bildsegmenten (Classification) als Kartiervorschlag

### **Multispektrale Aufnahmetechnologie**

Multispektrale Aufnahmeverfahren registrieren die vom Objekt reflektierte Strahlung in verschiedenen voneinander getrennten Spektralbereichen. Die Aufnahmen (spektrale Bänder) werden mit einer Fachkamera angefertigt, wobei optische Filter, die nur einen Teilbereich des reflektierten Spektrums passieren lassen, dem Objektiv vorgesetzt werden. Die spektralen Bänder werden zeitlich nacheinander auf hochauflösenden Schwarzweißfilm belichtet.

Bereits durch die Wahl geeigneter Rot-, Grün- und Blau-Filter gewährt das multispektrale Aufnahmeverfahren eine langzeitstabile Farbdokumentation des Objektes. Die systembedingten Farbtonverschiebungen der herkömmlichen Farbaufzeichnung auf Mehrschichtenfarbfilm können so weitgehend vermieden werden.

Bei Bedarf lässt sich das Aufnahmeverfahren durch zusätzliche engbandige Zwischenfilter

erweitern, die dann eine rechnerische Trennung von Farbnuancen erlauben, die das menschliche Auge nicht mehr erfassen kann.

Weiterhin können bei geeigneter Filter- und Filmwahl im angrenzenden UV- und nahem IR-Bereich für das Auge nicht sichtbare Information aufgezeichnet werden.

Als Lichtquelle werden Lampen eingesetzt, die einen möglichst neutralen Farbeindruck gewährleisten.

### **Multispektrale Auswertungsmethoden**

Um das Potenzial der Multispektralbilder für die Zustandserfassung von Bauwerksoberflächen zu erfassen, werden hier folgende Methoden angewendet:

- *Visuelles Monitoring mit Einzel- und Multiband-Bildern*

Jedes Oberflächenelement besitzt charakteristische spektrale Reflexionseigenschaften. Demzufolge können einige Spektralbänder die Visualisierung eines Phänomens verstärken oder unterdrücken. Wird ein Phänomen in genau einem Band gut abgebildet, erfolgt die optimale Visualisierung als monochromes Einzelbild. Wird dagegen ein Phänomen in mehreren Spektralbildern deutlich abgebildet, kann eine gute Visualisierung durch die Generierung eines Pseudocolorbildes erfolgen. Die Einzelbilder werden dabei jeweils einem Farbkanal zugeordnet und zusammen projiziert. So wird zum Beispiel zur Visualisierung der typischen Farbgebung eines Objektes am Bildschirm, den spektralen Bändern „Rot“, „Grün“ und „Blau“ die Monitorfarben Rot, Grün und Blau zugeordnet. Durch eine optimale Visualisierung des Phänomens wird die manuelle Kartierung erleichtert, da die Abgrenzung des Phänomens von seiner Umgebung durch den Bearbeiter schneller nachvollzogen werden kann.

- *Erzeugung von neuen Bilddateien durch mathematische Kombination von mehreren spektralen Bändern*

Durch die rechnerische Verknüpfung von Eingangsbilddaten können neue Bilder generiert werden. Ein häufig benutztes Verfahren ist dabei die Berechnung von Differenz- oder Quotientenbildern (Indexbilder) von zwei Bändern. Während die Differenzbilder die absoluten Unterschiede zwischen zwei Eingangsbildern aufzeigen, verdeutlichen die Quotientenbilder die partiellen, relativen Unterschiede zwischen den Eingangsbilddaten.

Die so erzeugten künstlichen Bilder unterstützen ebenfalls die manuelle Kartierung, können aber auch zusätzlich, neben den ursprünglichen Eingangsbildern, für Klassifikationsansätze genutzt werden.

- *Automatische Gruppierung von ähnlichen Bildsegmenten (Klassifizierung)*

Bei einer Klassifizierung werden die Bildpunkte in eine zuvor definierte Anzahl von Klassen eingeteilt.

Für die Klassenzuordnungen werden Regeln aufgestellt, die im Allgemeinen von den Helligkeitswerten in den einzelnen Spektralbändern abhängen. Wenn ein Bildpunkt einer gewissen Anzahl von Regeln entspricht, wird er einer entsprechenden Klasse zugeordnet. Können für ein Phänomen eindeutige Regeln aufgestellt werden, kann durch die Klassifizierung ein automatisierter Kartierungsvorschlag berechnet werden.

## **Anwendung der Verfahren am Markttor von Milet**

### ***Rahmenbedingungen***

Das multispektrale Aufnahmeverfahren wurde an einer ausgesuchten Testachse exemplarisch erprobt (Abb.1). Nach einer Serie von Testaufnahmen wurden sowohl die Aufnahmeanordnung und Aufnahmestandpunkte, als auch Beleuchtungsverhältnisse und Beleuchtungsrichtung in Absprache mit dem betreuenden Restaurator festgelegt.

### ***Multispektraler Datensatz***

Die ausgesuchte Testachse wurde durch insgesamt sechs Multispektralmotive im Maßstab 1:60 in jeweils sechs Bändern wie folgt abgebildet:

Band - Nr.	Bezeichnung	Spektralbereich
1	Ultraviolett (UV)	360-380 nm
2	Blauviolett (BV)	390-470 nm
3	Grün eng (Ge)	495-550 nm
4	Grün weit (visuelle) (Gw)	480-570 nm
5	Rot (R)	625-695 nm
6	Infrarot (Ir)	715-740 nm

Die Digitalisierung der Bilder erfolgte anschließend mit einer geometrischen Scanauflösung von 2000 DPI. Durch eine geometrische Bildbearbeitung mit einem polynomialen Transformationsansatz wurden die - zu jeweils einem Motiv gehörenden Bänder - digital überlagert.

## ***Beispiele zur multispektralen Auswertung***

### **Visualisierung der Mörtelschleier**

Zur Unterstützung der Schadensbestandsaufnahme durch optimierte Visualisierungshilfen wurden für den Schadenstyp „Mörtelschleier“ verschiedene Pseudofarbbilder generiert (Abb. 2A, 2B). Eine gute Darstellung wurde durch die Kombination der Spektralbänder IR, R und UV erzielt. Die Bereiche des Mörtelschleiers sieht man in dieser Bandkonstellation sehr deutlich, Fugenbereiche zeichnen sich jedoch in ähnlicher Weise ab. Eine Isolierung der Fläche ergibt sich jedoch nur über eine visuelle Kontextbetrachtung.

### **Aufdeckung von freigelegten Eisenteilen und Roststellen**

Zur Unterstützung der Materialbestandsaufnahme wurde versucht, am Objekt befindliche Eisenteile in den Bildern zu verdeutlichen. Gute Aussagen erhielt man mit den Quotientenbildern -UV/R- (Abb. 3E) und -Ge/R- (Abb. 3F). Während das Indexbild mit dem UV-Kanal neben dem Eisen auch Roststellen signalisiert, wird mit dem Grün-Kanal nur der „Eisenbereich“ hervorgehoben.

### **Klassifizierung der Marmortypen**

Die Verteilung der am Markttor von Milet verwendeten unterschiedlichen Marmortypen (undifferenzierter Marmor und gebänderter Marmor) stellte im Bereich der Bestandsaufnahme ein zentrales Thema dar.

Die Zuordnung Bauteil zu Materialien durch die Oberflächenreflexion im sichtbaren Spektrum ist jedoch nur bedingt möglich, da starke Oberflächenverschmutzungen die radiometrischen Eigenschaften zum Teil erheblich beeinflussen. Eine Differenzierung der Materialien allein durch das Farbbild war nicht möglich.

Verschiedene, durch Kanaldivisionen künstlich erzeugte Bilder, brachten im Vergleich zum Farbbild ebenfalls keine wesentlichen Verbesserungen.

Durch den Ansatz einer wissensbasierten Klassifizierung konnten jedoch „Trends“

herausgearbeitet werden (Abb. 4C). Die explizite Bestimmung von Bildpunkten der Flächen: undifferenzierter Marmor, gebänderter Marmor und Gipsabguss und daraus resultierend die Ermittlung der Reflexionswerte in allen aufgezeichneten Kanälen lieferte die typischen Helligkeitswerte der Pixel (spektrale Signaturen) . Die Minima und Maxima dieser Werte lieferten die oberen und unteren Schranken für das zugelassene Helligkeitsintervall pro Spektralband. Eine weitere „UND-Verknüpfung“ verschärfte die Klassifizierungskonditionen über die gleichzeitige Betrachtung aller Bänder. Das Klassifizierungsergebnis wurde dann über eine Filterfunktion geglättet, so dass isolierte klassifizierte Pixel eliminiert wurden und „durchlöcherte“ Flächen mit den Werten der Umgebungspixel gefüllt wurden.

## **Fazit**

Die Beispiele haben gezeigt, dass neben der objektiven und langzeitstabilen Farb-Abbildung des Markttores die Multispektralbilder und ihre Auswertung einen Beitrag zur Befunderhebung leisten.

Das Oberflächenrelief, die Oberflächenrauigkeit und die Patina beeinflussen das spektrale Reflexionsverhalten, sodass eine strenge Isolierung durch einen pixelbasierten Klassifizierungsansatz, wie er im Rahmen dieses Projektes getestet wurde, nur bedingt möglich ist. Eine Verbesserung der Ablesbarkeit der Phänomene aus den Bildern lässt sich jedoch erzielen.

Eine Erweiterung der Klassifizierungsmethoden mit strukturbasierten Methoden, in Kombination mit den hier erprobten pixelbasierten Verfahren, sollte in der Zukunft getestet werden.

## Abbildungen : Tafel 1



Abb. 1

Abb. 1 Testfläche für Multispektrale Auswertung

## Abbildungen : Tafel 2



Abb. 2A



Abb. 2B

Abb. 2A Multispektralbild mit der Bandkombination R, Gw und B zur Visualisierung des visuellen Farbeindrucks.

Abb. 2B Multispektralbild mit den Bandkombinationen IR, R, UV. Fugen und Flächen mit einem Mörtelschleier werden deutlich blau abgebildet.

### Abbildungen : Tafel 3



Abb. 3A



Abb. 3B

Abb. 3A Multispektralbild mit der Bandkombination R, Gw und B zur Visualisierung des visuellen Farbeindrucks. Der orange Bereich in der Mitte der Abbildung zeigt einen Bereich mit Eisenteilen und Roststellen auf.

Abb. 3B Multispektralbild: UV Kanal. Eisen und Rost zeichnen sich durch niedrige Helligkeitswerte ab.

### Abbildungen : Tafel 3



Abb. 3C

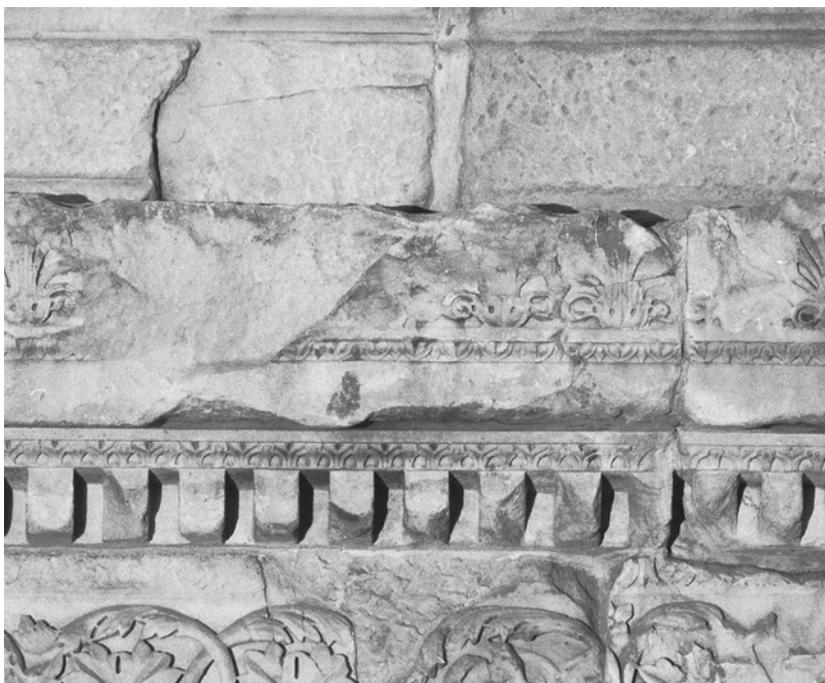


Abb. 3D

Abb. 3C Multispektralbild: Ge Kanal. Der Bereich „Eisen und Rost“ zeichnet sich durch eine kleinere Fläche ab (im Gegensatz zur Abb. 3B).

Abb. 3D Multispektralbild: R Kanal. Der Bereich „Eisen und Rost“ zeichnet sich nur noch gering ab.

### Abbildungen : Tafel 3



Abb. 3E



Abb. 3F

Abb. 3E Indexbild (UV/R). Sowohl Eisenteil als auch eine vermutliche Roststelle werden durch niedrige Tonwerte (dunkler Bereich in der Bildmitte) gekennzeichnet. Weiterhin zeichnet sich rechts unterhalb der „Roststelle“ ein Bereich durch große Tonwerte (heller Bereich) ab, der in den einzelnen Bändern nicht sichtbar ist. Diesem Bereich ist bisher kein Schadensphänomen zugeordnet.

Abb. 3F Indexbild (Ge/R). Ein Eisenteil wird durch niedrige Tonwerte (dunkler Bereich in der Bildmitte) gekennzeichnet. Die Rostbereiche verschwinden.

Eine strenge numerische Isolierung des Phänomens ist jedoch alleine über die Tonwerte nicht möglich, da die durch das Oberflächenrelief verschatteten Bereiche ähnliche Tonwerte liefern.

## Abbildungen : Tafel 4



Abb. 4A

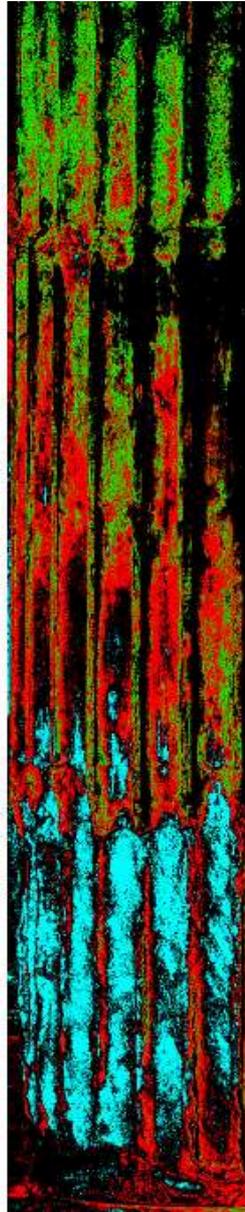


Abb. 4B

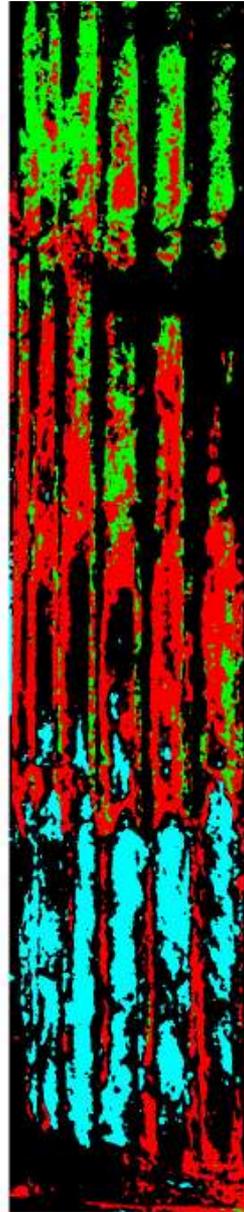


Abb. 4C

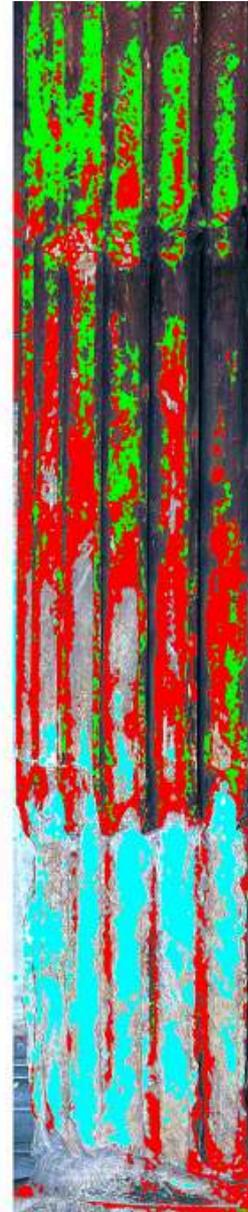


Abb. 4D

Abb. 4A Multispektralbild mit der Bandkombination R, Gw und B zur Aufzeichnung des visuellen Farbeindrucks.

Der untere Teil und obere Teil des abgebildeten Säulenabschnittes besteht aus Marmor, der mittlere Teil zeigt einen Gipsabguss.

Abb. 4B Wissensbasiertes Klassifizierungsergebnis auf Basis der Helligkeitswerte in allen Spektralkanälen zur Unterteilung der Klassen : gebänderter Marmor (Blau) , undifferenzierter Marmor (Grün) und Gipsabguss (Rot).

Durch starke Oberflächenverschmutzung und daraus resultierenden Störungen der „Materialreflexion“ im sichtbaren Spektrum ist eine exakte Trennung und Klassifizierung aller Pixel gemäß der drei Klassen nicht möglich. Unklassifizierte Pixel sind schwarz dargestellt. Ebenso führt die Verschmutzung und die Abschattung der Oberfläche zu fehlklassifizierten Bereichen.

Abb. 4C Durch einen „Glättungsfilter“ überarbeitetes Klassifizierungsergebnis (4B).

Abb. 4D Überlagerung von 4A mit 4C.

Die klassifizierten Bereiche stimmen im Allgemeinen gut mit den Befunden überein, trotz Fehlklassifizierung und „nicht-klassifizierter“ Bereiche lassen sich Trends gut erkennen.



## Anlage 19

Markttor von Milet: Schadwirkung durch Biofilme.

Michael Hoppert unter Mitarbeit von Oliver Schieweck,  
Institut für Mikrobiologie und Genetik der Universität  
Göttingen



# **Markttor von Milet: Schadwirkung durch Biofilme**

## **Bericht für die Deutsche Bundesstiftung Umwelt**

Michael Hoppert  
unter Mitarbeit von Oliver Schieweck

Universität Göttingen  
Institut für Mikrobiologie und Genetik  
Grisebachstr. 8  
D-37077 Göttingen

Tel 0551/393832  
Fax 0551 393793  
mhopper@gwdg.de

## **Einleitung**

Mikrobielle Biofilme können sich an allen Grenzschichten zwischen Feststoffen und Flüssigkeiten bzw. der gasförmigen Atmosphäre bilden. Der Witterung ausgesetzte Oberflächen von Stein und anderen Baumaterialien (Mörtel, Holz, aber auch Kunststoffe und Glas) sind häufig vollständig von Mikroorganismen besiedelt (Golubic et al., 1980; Hirsch et al., 1995). Schadwirkungen der Biofilme auf Bauwerken und anderen Monumenten sind vielfältig und an zahlreichen Beispielen in der Literatur dokumentiert (siehe z. B. Diakumaku et al., 1995, Panina et al., 1997, Sterflinger et al., 1997). In klimatisierten Innenräumen, mit geringem Nährstoffeintrag und unter kontrollierten Feuchtebedingungen sollte die Bildung von geschlossenen Biofilmen eigentlich vermeidbar sein. Wie jedoch diese Studie zeigt, sind auch unter den kontrollierten Bedingungen Biofilm-Bildungen möglich. Auf musealen Exponaten, Gesteinsplastiken oder Bauwerken kann von diesen Filmen natürlich ebenso eine Schädigung ausgehen, wie das für außen exponierte Objekte der Fall ist (farbliche Veränderung der Oberfläche, Eindringen von Organismen in den Stein oder Baumaterial, Absanden und Abplatzen oberflächlicher Schichten). Die im Rahmen des DBU-Projektes durchgeführten Vorab-Untersuchungen am Markttor von Milet (Pergamon-Museum, Berlin) zeigen das Vorhandensein eines Films auf einem Teil der Oberfläche des Bauwerkes.

## **Methoden**

Proben wurden von waagerechten und senkrechten Oberflächen des Markttores, von Original- wie auch ersetzten Teilen abgenommen. Die Proben wurden in dem in Abb. 1A markierten Bereich des Markttores gesammelt.

### **Isolierung von Mikroorganismen**

Oberflächlich dem Material anhaftende Organismen wurden unter sterilen Bedingungen mit einer Agar-getränkten Filterschicht (Sartorius, Göttingen) abgenommen und auf ein Agar-Nährmedium zur Anzucht oligotropher Organismen übertragen und bei 7 °C, 20 °C und 30 °C bebrütet. Gegebenenfalls wurden Organismen nach mehrmaligem Überimpfen vereinzelt und auf Standard-Nährmedien übertragen. Die Kultivierung wurde bei einer Umgebungstemperatur von 30 °C fortgesetzt.

Luftkeimproben wurden mithilfe eines Biotest Air Samplers (Biotest, Dreieich) unter Verwendung eines standardisierten Agarmediums nach Angabe des Herstellers (s. u.) gesammelt. Die Streifen wurden bis zu 5 Tage bei 30 °C inkubiert, gebildete Kolonien ausgezählt und auf 1 m<sup>3</sup> Raumluft hochgerechnet.

Von abgeschabten Belägen (Schabeproben) wurden kleine Mengen verwendet, um hieraus in geeigneten Flüssigmedien (s. u.) Schwefeloxidierer oder Nitrifizierer anzuziehen. Für die Anzucht von Organismen aus Oberflächen-Abdrücken wurden verschiedene Medien (s. u.) eingesetzt. Um möglichst viele Oligotrophe zu erfassen (d. h. Organismen, die auf niedrige Nährstoffkonzentrationen angepasst sind), wurden diese Medien unverdünnt (wie angegeben), sowie 1/10 und 1/100 verdünnt eingesetzt. Zudem wurde reiner bakteriologischer Agar (1.5 %ig in Wasser) eingesetzt. Alle Medien wurden für 30 min autoklaviert.

### Medium zum Nachweis von Luftkeimen nach dem Biotest-Verfahren

Malzextrakt	30,0 g
Sojapepton	3,0 g
Bacto-Agar	15,0 g
dest. Wasser	ad 1000 ml

### Malzextrakt-Medium

Malzextrakt	10,0 g
Glucose	5,0 g
Agar	15,0 g
bidest. Wasser	ad 1000 ml

### Luria-Bertani-Medium

Trypton	10,0 g
Hefe-Extrakt	5,0 g
NaCl	10,0 g
bidest. Wasser	ad 1000 ml

### Nitrifizierer-Medium

(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	500 mg
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	70 mg
MgSO <sub>4</sub> x 7 H <sub>2</sub> O	50 mg
CaCl <sub>2</sub> x 2 H <sub>2</sub> O	50 mg
Spurenelemente-Lsg SL 6	1,0 ml
Phenolrot (0,1 %)	1,5 ml
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (5 %)	Zugeben bis pH ca 8 (Indikatorfarbe Rot)
bidest. Wasser	ad 1000 ml

### Thiosulfat-Medium

Na <sub>2</sub> S <sub>2</sub> O <sub>3</sub> x 5 H <sub>2</sub> O	10 g
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	4 g
MgCl <sub>2</sub>	0,7 g
NH <sub>4</sub> Cl	0,4 g
CaCl <sub>2</sub> x 2 H <sub>2</sub> O	0,05 g
Spurenelemente Lösung SL 6	1 ml
Agar	15 g
bidest. Wasser	ad 1000 ml
	pH 6.8

## Präparation von Biofilmen für die Mikroskopie

Von den Oberflächen des Bauwerkes wurde das anhaftende organische Material (z. B. evtl. vorhandene mikrobielle Biofilme) durch Kopplung an reaktive Aldehydgruppen abgenommen. Hierzu wurde die Oberfläche eines wässrigen Gels bestehend aus 10 % (w/v) Gelatine und 1 % (w/v) Bacto-Agar mit einem Tropfen 5 % Glutardialdehyd-Lösung benetzt. Das Gel wurde auf die Oberfläche des Baumaterials gepresst und mechanisch fixiert. Nach einer Inkubationszeit von 1,5 h wurde das Gel entfernt und für weitere 1,5 h in einer Glutardialdehyd-Lösung (5 %, v/v) inkubiert. Der erhärtete Gelatineblock wurde in erstarrenden 1,5 %igen Bacto-Agar eingetaucht. Das gelierte Agarstückchen wurde in kleine Blöcke geschnitten. Die Blöckchen wurden in einer gepufferten Salinelösung (50 mM Kaliumphosphatpuffer, pH 7,0; 0,9 %, w/v, Kochsalz) unter mehrfachem Wechsel des Puffers für je 5 min inkubiert. Die so gewaschenen Proben wurden entwässert und in Kunstharz eingebettet. Für die Standard-Elektronenmikroskopie wurde das Material in Spurr-Harz eingebettet. Alle für die verschiedenen Licht- und elektronenmikroskopischen Markierungen eingesetzten Proben wurden in das Tieftemperatur-Einbettungsharz Lowicryl K4M eingebettet.

## Einbettung in Spurr-Einbettungsharz (Spurr, 1969)

Die Entwässerung der Proben mittels einer ansteigenden Acetonreihe und die anschließende Infiltration mit Spurr-Kunstharz wurde nach folgendem Protokoll durchgeführt:

Lösungen	Temperatur	Inkubationszeit
10 % Aceton (v/v) in bidest. Wasser	0 °C	30 min
30 % -----"-----	0 °C	30 min
50 % -----"-----	0 °C	60 min
70 % Aceton (v/v) in bidest. Wasser + 2 % Uranylacetat	0 °C	über Nacht
70 % Aceton (v/v) in bidest. Wasser	0 °C	60 min
90 % -----"-----	0 °C	60 min
100 % -----"-----	0 °C	60 min
100 % -----"-----	RT	60 min
Aceton : Spurr-Harz 4 : 1	RT	60 min
Aceton : Spurr-Harz 2 : 1	RT	60 min
Aceton : Spurr-Harz 1 : 4	RT	90 min
Spurr-Harz	RT	über Nacht
Spurr-Harz	RT	12 h

Anschließend wurden die Proben in Gelatinekapseln überführt und mit frischem Kunstharz überschichtet. Zur Entfernung von Gasblasen wurden die Gelatinekapseln mit den Proben in einem Exsikkator für 10 min evakuiert. Die Polymerisation des Spurr-Harzes erfolgte in einem Wärmeschrank für 8 h bei 70 °C.

Kunstharzkomponenten:

Vinylcyclohexendioxid	15,0 g
Diglycidether von Polypropylenglycerol (D.E.R. 732)	6,0 g
Nonenylbernsteinsäureanhydrid (NSA)	39,0 g
$\alpha$ -Dimethylaminoethanol	0,6 g

### Tieftemperatureinbettung in Lowicryl-K4M-Harz (Carlemalm et al., 1982; modifiziert)

Die Tieftemperatureinbettung gewaschener Proben erfolgte nach dem unten angegebenen Schema.

Entwässerungszeiten bei der Tieftemperatureinbettung

Lösungen	Temperatur	Verweildauer
15 % Methanol in bidest. Wasser	0 °C	15 min
30 % -----"-----	0 °C	15 min
50 % -----"-----	- 20 °C	30 min
70 % -----"-----	- 35 °C	30 min
95 % -----"-----	- 35 °C	30 min
100 % Methanol	- 35 °C	1 h
Methanol/Kunstharz (50 %/50 %)	- 35 °C	1 h
Methanol/Kunstharz (35 %/65 %)	- 35 °C	1 h
100% Kunstharz	- 35 °C	2 x 12 h

Nach dem letzten Kunstharz-Schritt wurde der Proben-Block in eine mit Lowicryl K4M-Harz gefüllte Gelatine kapsel überführt. Die Polymerisation des Kunstharzes erfolgte bei -35 °C unter UV-Licht (360 nm) für ca. 48 h und bei Raumtemperatur unter UV-Licht für ca. 72 h.

Kunstharzkomponenten:

Crosslinker A	2,7 ml
Monomer B	17,3 ml
Initiator C	0,1 g

### Ultramikrotomie

Aus den polymerisierten Proben wurden mit einem Ultramikrotom (Ultracut E, Reichert, Wien) Schnitte einer Dicke zwischen 70 und 200 nm für die Elektronenmikroskopie hergestellt. Für die Lichtmikroskopie wurden Schnitte einer Dicke von 30  $\mu$ m hergestellt. Geschnitten wurde mit Glasmessern, die aus einem Streifen eines 25 mm breiten und 6,5 mm dicken Tafelglases mittels eines Knifemakers (LKB Bromma, Schweden) gebrochen wurden. Die Schnitte wurden in einem Trog aufgefangen, der Wasser als Trogflüssigkeit enthielt und anschließend auf Formvar-beschichtete Kupfer- oder Nickel-Objekträgernetze aufgenommen.

Die Schnitte wurden anschließend entweder für 5 min mit 4 % (w/v) Uranylacetat-Lösung kontrastiert oder unkontrastiert für Markierungstechniken eingesetzt.

## **Markersysteme**

Als Markersysteme eingesetzt wurden Concanavalin A, gekoppelt an den Fluoreszenzfarbstoff FITC (einem Fluorescein-Derivat) oder an kolloidales Gold, bzw. polyklonales Antiserum gegen extrazelluläre Polymere eines Biofilms. Die Herkunft der Antikörper sowie die Herstellung der Markersysteme sind beschrieben in Hoppert et al. (2002) und Hoppert & Holzenburg (1999).

## **Markierungstechniken für die Elektronenmikroskopie (ROTH et al., 1978)**

Die Grids wurden 2 h auf 30 µl großen Tropfen der jeweiligen Antiserum-Verdünnung oder Concanavalin A-Gold inkubiert. Das Antiserum wurde 1/100, Concanavalin A-Gold 1/10 verdünnt, entsprechend 0,3 mg/ml Serum bzw. 0.15 mg/ml Concanavalin A. Nach dem 15-sekündigen Spülen der auf Antiserum inkubierten Grids mit einer PBS/Tween 20-Lösung (s. u.) mittels einer Spritzflasche wurden die Grids zweimal für 5 min auf je 30 µl großen Tropfen PBS/Tween und einmal 5 min auf einem gleichgroßen Tropfen reiner PBS-Lösung inkubiert. Für die Markierung der gebundenen Antikörper wurden die Grids auf 20 µl großen Tropfen einer in PBS/BSA (1%ig, w/v) 1:100 verdünnten Lösung von IgG-gekoppeltem Gold-Kolloid (10-nm-Gold, Sigma, Heidelberg) 30 min inkubiert. Nach einer erneuten Spülung der Grids mit PBS für 15 s (s.o.) wurden diese wiederum zweimal für je 5 min auf 30 µl großen Tropfen der PBS/Tween 20-Lösung inkubiert. In einem letzten Waschschritt wurden die Grids 5 min auf einem 30 µl-Tropfen Wasser (bidest.) inkubiert. Die Grids wurden abschließend in %iger (w/v) Uranylacetat-Lösung für 5 min inkubiert und so kontrastiert.

Die mit Concanavalin A behandelten Grids wurden zweimal für 5 min auf Tropfen Tris/BSA (50 mM + 1%, w/v, BSA pH 7.5) abgelegt und ebenfalls auf Wassertropfen gespült und kontrastiert.

### PBS-(Tween 20) Lösung

Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	11,50 g
NaH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2,96 g
NaCl	5,84 g
(Tween 20	0,50 ml)
H <sub>2</sub> O (dest.)	ad 1000 ml
	pH 7,5

Elektronenmikroskopische Präparate wurden in einem Transmissions-Elektronenmikroskop bei einer Beschleunigungsspannung von 60 und 80 kV untersucht (EM 301, Philips, Eindhoven, Niederlande). Für die Mikrographien wurden Planfilme (Abmessungen 6,5 cm x 9 cm) als Negativmaterial verwendet.

## **Markierungstechnik für die Lichtmikroskopie**

Für die lichtmikroskopischen Abbildungen wurden die Schnitte mit 1/10 - 1/1000 verdünntem Concanavalin A (FITC-gekoppelt; Sigma, Heidelberg) auf Tropfen inkubiert, in der oben beschriebenen Weise gespült und unkontrastiert für die Fluoreszenz-Lichtmikroskopie

eingesetzt. Verwendet wurde der Filtersatz 09 (Zeiss, Göttingen) in einem Fluoreszenz-Lichtmikroskop (Axiophot; Zeiss). Für die Fotografie wurde Color-Negativmaterial (400 ASA) eingesetzt.

## Ergebnisse und Diskussion

### Keimzahlen in der Raumluft und auf der Oberfläche des Materials

Um einen Eindruck über die gesamte mikrobielle Belastung der Raumluft im unmittelbaren Umfeld des Markttors zu gewinnen, wurden Keimzahlen in der Raumluft und auf der Objektoberfläche bestimmt. Die Zahl der bakteriellen koloniebildenden Einheiten (CFU) variierte zwischen 700 (in 3 und 1,5 m Höhe über dem Sockel) und 2800 Organismen (in 30 cm Höhe über dem Sockel) pro m<sup>3</sup> Raumluft. Damit liegt der Anteil bakterieller Organismen etwa 5-fach höher als für vergleichbare Gebäude bei Verwendung derselben Messmethode. Der Anteil pilzlicher CFU war mit bis zu 50 Einheiten jedoch recht gering. Hier werden häufig auch 3 - 5fach höhere Werte für vergleichbare Gebäude gefunden. Die Zahlen allein ergeben keine Aussage über die Auswirkungen von Mikroorganismen auf das Bauwerk. Der hohe Anteil bakterieller Organismen in der Raumluft lässt allerdings auf eine Situation schließen, in der sich gerade Bakterien (gegenüber Pilzen) leicht vermehren, z. B. eine durch Klimatisierung, viel Publikumsverkehr oder äußere Witterungsbedingungen bedingte hohe Luftfeuchtigkeit. Da Luftkeime und Sporen in der Regel an (größere) Staubpartikel adsorbiert sind, ist die Keimzahl auch immer ein indirekter Ausdruck für die Gesamtlast an Aerosolen in der Raumluft. Der erheblich höhere Anteil von Organismen in Nähe des Bodens zeigt dies ebenfalls, da hier auch die Aerosolkonzentration durch aufgewirbelten Staub hoch ist.

Die Keimzahl in der Luft hat keine direkten Auswirkungen auf die Ausmaße eines Biofilms auf einer Materialoberfläche. Das Reservoir an Sporen und anderen Dauerformen ist auch bei niedrigen Keimzahlen hoch genug, um das Wachstum eines Biofilms zu initiieren, wenn die Oberfläche sich hierfür eignet. Die Zahl von Mikroorganismen auf der Materialoberfläche zeigt eine signifikante Erhöhung der Keimzahlen insbesondere auf waagerechten, bodennahen Flächen und auf stark skulpturierten Oberflächen der Kapitelle und Friese (Fig. 1 B). Von glatten, senkrechten Flächen lassen sich keine Keime abnehmen. Die Zahlen geben allerdings nur die Organismen wieder, die sich über Oberflächenabdrücke, d.h. ohne große mechanische Kraft, von der Oberfläche abnehmen lassen. Diese Organismen werden vor allem über Staubpartikel auf die Oberfläche eingetragen (Fig. 2 D) und sind in der Regel nicht in einen Biofilm eingebettet.

### Nachgewiesene Organismen mit potentiellen Schadwirkungen auf die Materialoberfläche

Potentielle Schadwirkungen gehen von Organismen aus, die anorganische oder organische Säuren produzieren. Schwefeloxidierende oder nitrifizierende Bakterien (z. B. *Thiobacillus*, *Nitrosomonas*) wurden in keiner der Proben von der Materialoberfläche nachgewiesen. Typischerweise treten die Organismen dort auf, wo reduzierte Schwefel- bzw. Stickstoffverbindungen zur Verfügung stehen und die Oberflächen zumindest periodisch angefeuchtet sind. Auch die photoautotrophen Organismen (eukaryotische Algen oder Cyanobakterien) benötigen zumindest periodisch durchfeuchtete Oberflächen. Auch Organismen dieser Gruppen wurden in Proben von der Materialoberfläche nicht gefunden.

Pilze (v.a. Ascomyceten) sind auf die vorgefundenen Bedingungen am besten angepasst. Während der Anteil der koloniebildenden Einheiten (CFU) in der Raumluft nur 3-4 % betrug, wurden in Abdrücken von der Oberfläche des Materials ca. 40 % pilzliche CFU gefunden, außer auf stark staubbelasteten Oberflächen, wo der Anteil pilzlicher CFU bei ca. 20 % lag (vgl. Fig. 3). Zieht man die im Vergleich zu Bakterien weitaus größere Biomasse eines pilzlichen Organismus in Betracht, sind die Pilze auf der Materialoberfläche die dominierende Lebensform. In Raumluft und auch auf den Oberflächen des Baumaterials finden sich

üblicherweise Pilze der Gattungen *Cladosporium* (ca. 80 %), *Penicillium* (ca. 5 %), *Chrysosporium* (ca. 5 %), *Alternaria* (ca. 3 %), und *Aspergillus* (ca. 1 %). Potenzielle Schadwirkung der Pilze geht aus von der Produktion organischer Säuren, die Bildung extrazellulärer Polymere (EPS) und die Pigmentierung der besiedelten Oberflächen. EPS bestehen von allem aus (verzweigten) Polysacchariden und wirken wie eine Kittsubstanz zwischen den Mikroorganismen und der Oberfläche des Bauwerkes. Sie machen den weitaus größten Volumenanteil eines Biofilms aus und dringe passiv in die Oberfläche polykristalliner Baumaterialien ein. Sie ermöglichen den Transport organischer Säuren zur Materialoberfläche hin und sind an Remineralisationen beteiligt. Damit sind sie auch aktiv an der Auflösung der Materialoberflächen beteiligt.

Ein offensichtliches Schadensbild sind unregelmäßige, fleckige dunkelbraune bis schwarze Überzüge (Fig. 2 A - C), die ca. 5 % der untersuchten Oberfläche bedecken. Von der Materialoberfläche gewonnene Pilzisolat zeigen das typische Bild der Form-Familie der Dematiaceae, die neben pigmentierten Konidien und Konidienträgern auch pigmentierte Hyphen besitzen (Fig. 3 B - D). *Alternaria* ist ein typischer Vertreter dieser Familie. Die Auswirkungen von Organismen dieser Gruppe auf Kunstdenkmäler ist bekannt (Sterflinger & Krumbein, 1997), allerdings bisher nicht für Monumente in Innenräumen untersucht worden. An den Schabeproben lässt sich, da die Organismen ja aus ihrem Gesamtzusammenhang auf der Oberfläche des Materials herausgelöst sind, eine Biofilm-Bildung nicht nachweisen, wohl aber das Vorhandensein der Pilze (Fig. 4 A).

### **Nachweis extrazellulärer Polymere**

Vie oben ausgeführt, sind extrazelluläre ein typischer Bestandteil eines Biofilms und aktiv an Schadprozessen an der Materialoberfläche beteiligt. Ein typischer Bestandteil der extrazellulären Polymere wurde über Fluoreszenzmarkierung lichtmikroskopisch zunächst in Schabeproben nachgewiesen (Fig. 4 B). Hierzu wurde das Lectin Concanavalin A (Con A) eingesetzt. Lectine binden spezifisch an bestimmte Gruppen, hier Glycosyl- und Mannosyl-Gruppen in Polysacchariden, dem Hauptbestandteil der EPS. Darüber hinaus wurde ein polyklonaler Antikörper mit ähnlichen Bindungseigenschaften verwendet. Das an einen Fluoreszenzfarbstoff gebundene Con A bindet an eine Fraktion schwach lichtbrechender, nicht mineralischer Partikel. Die stark lichtbrechenden mineralischen Partikel sind, wie Fig. 4 C und D zeigen, oft über EPS miteinander verklebt.

Zur genauen Erfassung der Biofilm-Struktur wurden kleine Proben in situ chemisch fixiert und gleichzeitig mit einem Trägermaterial (Agar-Gelatine Gel) so verklebt, dass sie sich vollständig von der Unterlage ablösen ließen. Nach Einbettung in Kunstharz ließen sich die Proben semidünn (0.5 – 5 µm) bzw. ultradünn (100 nm) schneiden. Damit waren sie für licht- und elektronenmikroskopische Untersuchungen sowie für Markierungstechniken zugänglich. Durch die Verklebung ist die ursprünglich zur Atmosphäre hin orientierte Oberfläche des Biofilms an das Trägermaterial fixiert. In den Abbildungen ist diese Seite immer nach unten orientiert. Fig. 5 A zeigt in Übersicht die Gesamtansicht eines Querschnitts durch die oberflächliche Auflage. Sie besteht aus einer deutlich abgrenzbaren Matrix, in die eine Reihe von Partikeln eingebettet sind (Fig. 5 B, Fig. 8). Diese sind elektronendicht (im Lichtmikroskop stark lichtbrechend), daher sehr wahrscheinlich mineralisch. Lamellen- oder bandförmige Bereiche, die ohne Anfärbung im Licht- und Elektronenmikroskop kaum zu sehen sind (nach Kontrastierung im Elektronenmikroskop dunkel gegen den Untergrund), konnten durch Immunmarkierung sowie mit dem Marker Con A im Licht- und auch im Elektronenmikroskop an Dünnschnitten als EPS identifiziert werden (Fig. 6, 7). Neben diesen deutlich abgegrenzten Bereichen, in denen die EPS gewissermaßen kondensiert ist (entspricht Kapselmaterial und Zellwänden abgestorbener Zellen), findet sich nach der Markierung die

EPS auch als verbindende Matrix zwischen den mineralischen Partikeln (siehe insbes. Fig. 6 F). Im gesamten Erscheinungsbild ähnelt der Film sehr stark Biofilmen, die auf Gebäudeaußenflächen oder künstlich im Labor gezogen wurden (Fig. 9). Die Dicke der Filme schwankt auch innerhalb kurzer Distanzen sehr stark (innerhalb  $\sim 0.1$  mm zwischen 15 und 50  $\mu\text{m}$ ); auch der relative Anteil der Fraktionen (mineralisch, EPS) ändert sich in diesen kurzen Abständen. Damit kann auch kein signifikanter Unterschied zwischen Biofilmen von unterschiedlichen Unterlagen (Marmor bzw. Mörtel) festgestellt werden. Die Biofilm-Auflagen auf waagerechten Bereichen des Sockels sind allerdings meist durchgehend 30-50  $\mu\text{m}$  dick.

Verschiedene, schon durch ihre Konturen unterscheidbare Typen von mineralischen Partikeln sind in die Matrix eingebettet. Die Partikel mit Größen von 0.1 – 15  $\mu\text{m}$  und unregelmäßigen Konturen finden sich gehäuft an der ursprünglichen Grenzfläche zwischen Film und Unterlage (in den Abbildungen der Querschnitte immer nach oben orientiert, siehe insbes. Fig. 5 A und 8 A). Damit ist wahrscheinlich, dass sie unmittelbar aus der Unterlage herausgelöst sind und jetzt von EPS umgeben. Auffällig sind neben diesen Partikeln nadelförmige Kristalle einer bestimmten Größenklasse (Fig. 8 A, B). Lage, Größe und Form der nadelförmigen Kristalle deuten darauf hin, dass sie durch Remineralisation in dem Biofilm an der EPS-Matrix entstanden sind. So ist die Bildung nadelförmiger Whewellit-Kristalle (Calciumoxalat-Monohydrat) eine häufige Erscheinung bei Remineralisationsprozessen mit Pilzen (siehe z. B. Banfield et al., 1999). Weitere mineralische Komponenten können sekundär eingetragen worden sein, wobei hier wiederum Markttor und andere benachbarte (Architektur-)Oberflächen als Quellen der Partikel infrage kommen.

## **Zusammenfassung der Schadwirkungen**

In Abb. 10 sind die Abläufe in einem solchen Biofilm modellhaft zusammengefasst. In einer Matrix aus EPS befinden sich relativ wenige Zellen. Versorgt werden diese über mineralische Substrate, die aus der Unterlage herausgelöst oder als Staubfraktion angeliefert werden. Über die Luft werden - gasförmig oder in Form von Stäuben - organische Substrate angeliefert.

In der EPS findet Remineralisation statt, was in jedem Fall mit Auflösung der mineralischen Unterlage verbunden ist. An der Auflösung der Unterlage ist die EPS beteiligt, die von der Oberfläche ausgehend in Porenräume eindringt, diese verklebt und sich lockernde Partikel aus der Unterlage herauslöst.

Unter der kontrollierten Atmosphäre eines Innenraumes entwickeln sich Biofilme sehr langsam, solange die Oberflächen nicht durchfeuchtet sind. Damit entfalten sich Schadwirkungen auch entsprechend langsam. Im vorliegenden Falle wird die Oberfläche des Bauwerkes durch den Film in zweifacher Hinsicht beeinträchtigt:

- Pigmentierung der Oberfläche
- Herauslösung oberflächlicher Partikel

Der Umfang der Schadwirkungen betrifft nur die Oberfläche bis in eine Tiefe von maximal 100  $\mu\text{m}$ . Diese Biofilme könnten die Substanz des Bauwerkes nicht angreifen, sie führen aber zu einer deutlichen Beeinträchtigung der Oberfläche, die ja für die Wahrnehmung des Bauwerkes durch den Betrachter von entscheidender Bedeutung ist.

## Literatur

- Banfield, J.F., Barker, W.W., Welch, S.A., Taunton, A. (1999) Biological impact on mineral dissolution: application of the lichen model to understanding mineral weathering in the atmosphere. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 96, 3404-3411.
- Carlemalm, E., Garavito, R.M., and Villiger, W. (1982) Resin development for electron microscopy and an analysis of embedding at low temperature. *J. Microsc.* 126, 123-143.
- Diakumaku, E., Gorbushina, A.A., Krumbein, W.E., Panina, L., Soukharjevski, S. (1995) Black fungi in marble and limestones - an aesthetical, chemical and physical problem for the conservation of monuments. *Sci. Total Environ.* 167, 295-304.
- Golubic, S., Friedmann, E.I., Schneider, J. (1980) The lithobiontic ecological niche, with special reference to microorganisms. *J. Sediment. Petrol.* 51, 475-478.
- Hirsch, P., Eckhardt, F.E.W., Palmer, R.J., jr. (1995) Fungi active in weathering of rock and stone monuments. *Can. J. Bot.* 73, S1384-S1390.
- Hoppert, M., Berker, R., Flies, C., Kämper, M., Pohl, W., Schneider, J., Ströbel, S. (2002) Biofilms and their extracellular environment on geomaterials: Methods for investigation fdown to nanometre scale. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 205, 199-207.
- Hoppert, M., Holzenburg, A. (1999) *Electron Microscopy in Microbiology*. Bios Scientific Publ., Oxford.
- Panina, L.K., Badalyan, A.G., Bogomolova, E.V., Wollenzien, U., Gorbushina, A.A., Krumbein, W.E., Sukharzhevskii, S.M. (1997) EPR-spectra of dark-coloured micromycetes isolated from the marble. *Mikologiya i Fitopatologiya* 31, 46-51.
- Roth, J., Bendayan, M., Orci, L (1978) Ultrastructural localization of intracellular antigens by the use of Protein A-gold complex. *J. Histochem. Cytochem.* 26, 1074-1081.
- Sterflinger, K., De Baere, R., De Hoog, G.S., De Wachter, R; Krumbein, W.E., Haase, G. (1997) *Coniosporium perforans* and *C. apollinis*, two new rock-inhabiting fungi isolated from marble in the Sanctuary of Delos (Cyclades, Greece). *Antonie van Leeuwenhoek* 72, 349-363.
- Sterflinger, K., Krumbein, W. E. (1997) Dematiaceous fungi as a major agent for biopitting on mediterranean marbles and limestones. *Geomicrobiol. J.* 14, 219-230.
- Spurr, A. R. (1969) A low-viscosity epoxy resin-embedding medium for electron microscopy. *J. Ultrastruct. Res.* 26, 31-43.

## Abbildungen

### Fig. 1. Probenahme am Markttor von Milet

A) Die Proben an dem Markttor wurden in dem durch das Rechteck markierten Bereich genommen.

B) Mikrobielle Belastung der Oberflächen (linke Abb.) eines beprobten Risalites (mittlere Abb.). Lufkeimzahlen (rechte Abb.) aus drei Höhen (in gleicher Entfernung von den Seitenwänden) über dem Sockel.

### Fig. 2. Auffällige Veränderungen der Materialoberfläche

Auffällige schwarzbraune Verfärbungen der Oberfläche im Bereich des Sockels (A) und des Frieses (B, C). Auf waagerechten Oberflächen stellen die organischen Anteile der Staubfraktion eine wesentliche Kohlenstoffquelle für Mikroorganismen dar (D). Fasern bestehen zu großen Teilen aus Cellulose (großes Bild) und menschlichen Haaren (Inset).

### Fig. 3. Isolierte Organismen von den Materialoberflächen

A) Wachstum von Organismen überimpft von demselben Oberflächen-Abdruck auf verschiedene Medien. Auf Trypton/Hefe-Extrakt-Medien wachsen vor allem pigmentierte bakterielle Luftkeime (linke Abb.), auf Malzextrakt-Medium Pilze (mittlere Abb.). Auffällig das Wachstum zahlreicher Pilzkolonien auf einem nährstoffarmen Agarmedium (rechte Abb.). B, C, D) Dematiaceae mit pigmentiertem Mycel (C) können, neben Pilzen mit unpigmentiertem Mycel (B) regelmäßig von den Oberflächen isoliert werden. Die Pilze dringen bevorzugt in ihre Unterlage ein (D).

### Fig. 4. Fluoreszenzmikroskopie von Schabeproben

A) Pilzhyphe links im Phasenkontrast, rechts rot fluoreszierend (mit Fluoreszenz-Lichtmikroskopie dargestellt). Die Hyphe ist an ein Quarzkorn angeheftet.

B) Nachweis von extrazellulären Polymeren (EPS). Links Phasenkontrast mit stark lichtbrechenden (hell aufleuchtenden=optisch dichten) mineralischen Partikeln. Rechts markierte EPS in demselben Bildausschnitt im Fluoreszenzlicht.

C) Einzelne Partikel sind von extrazellulären Polymeren überzogen und werden durch diese verklebt.

D) Fluoreszierende EPS (oben: kombiniertes Phasenkontrast/Fluoreszenzbild, Mitte und Unten: Phasenkontrast bzw. Fluoreszenz) und nicht fluoreszierende mineralische Partikel.

### Fig. 5. Elektronenmikroskopische Abbildung eines Biofilm-Querschnitts

A) Übersicht über einen Biofilm-Querschnitt. Auffällig sind zahlreiche eingebettete mineralische Partikel (Kreismarkierung oben) und dunkel kontrastierte, bandförmige, eingefaltete Strukturen (Kreismarkierung unten).

B, C) Detailvergrößerungen mit eingebetteten Partikeln (B) und eingefalteten Strukturen (C).

### Fig. 6. Nachweis von extrazellulären Polymeren in situ durch Con A-FITC und Con A-Gold

A) Lichtmikroskopische Hellfeldaufnahme eines Semidünnschnitts durch einen Biofilm mit zahlreichen, im Phasenkontrast hell aufleuchtenden (=optisch dichten) Partikeln.

B, C, D) Lichtmikroskopische Fluoreszenzaufnahmen markierter Ultradünnschnitte mit hell aufleuchtenden mineralischen Partikeln und flachen langgezogenen Strukturen (Pfeile), die in der Negativkontrolle (D) nicht nachzuweisen, also unmarkiert sind.

E) Mit Con A-Gold markierter Ultradünnschnitt. Dargestellt sind die in B und C markierten hell aufleuchtenden langgezogenen Strukturen in entsprechend hoher Vergrößerung. Sie tragen die Markierung in Form der schwarzen Goldpartikel (Kreismarkierungen).

F) Auch zwischen dunklen (elektronendichten) Partikeln zeigt eine Hintergrundmarkierung (Kreismarkierungen) die Anwesenheit von extrazellulären Polymeren an.

**Fig. 7. Immunoelektronenmikroskopie der extrazellulären Polymere**

Antikörper, die gegen eine EPS-Fraktion aus einem nativen Biofilm hergestellt wurden, reagieren ebenso wie die Con A-Konjugate mit den extrazellulären Polymeren. (A) stellt eine Situation analog Abb. 6 E dar, B) und C) zeigen markierte bandförmige Strukturen wie in Abb. 5 C (unmarkiert) und 6 E (Con A-markiert).

**Fig. 8. Mineralische Partikel in Biofilmen**

Neben unregelmäßig geformten Partikeln (A, B) fallen nadelförmige Kristalle auf, (Kreismarkierungen in A und B), die wahrscheinlich in den extrazellulären Polymeren gewachsen sind.

**Fig. 9. Terrestrische Biofilme, isoliert von außen exponierten Oberflächen**

A) Ähnlich der Darstellung des Biofilms in Fig. 5 A finden sich neben Fragmenten abgestorbener Zellen (b) und wenig lebenden Zellen v. a. dunkle, bandförmige Strukturen (d), den Überresten von Zellwänden abgestorbener Zellen.

B) extrazelluläre Polymere bilden lamelläre Strukturen parallel zur Zellhülle von Organismen, hier einem Cyanobakterium; das Filament besteht aus mehreren Zellen und ist in Längsrichtung angeschnitten.

**Fig. 10. Schadensmechanismen und Auswirkungen der untersuchten Biofilme auf dem Marktort von Milet**

In die EPS (hellgrün) eingebettet sind (wenige) lebende Organismen, die die Polymere bilden, und Überreste abgestorbener Zellen (Zellwände, etc.). Remineralisation führt zur Bildung von kristallinen Präzipitaten. Die EPS dringt in die sich öffnenden Porenräume in der polykristallinen Materialoberfläche ein. Partikel lösen sich von der Oberfläche ab. Sichtbare Auswirkungen der Biofilmbildung ist eine verfärbte und destabilisierte Materialoberfläche.

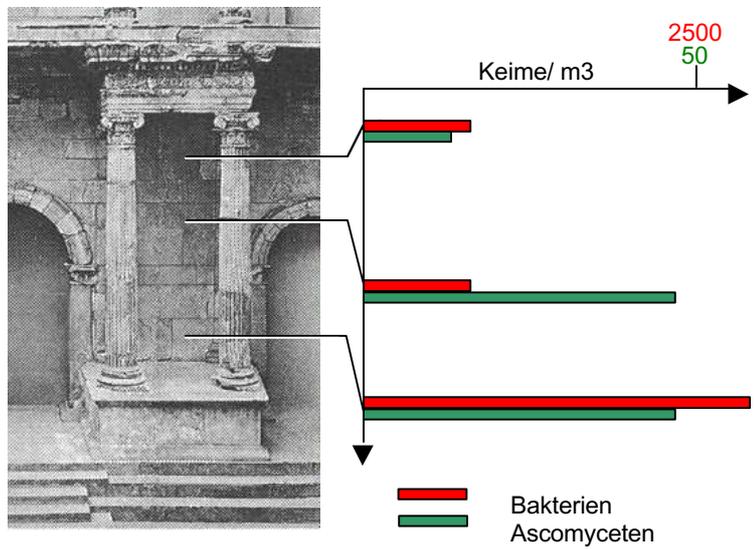
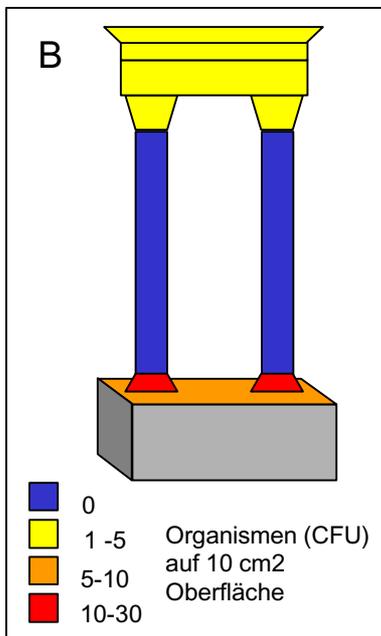
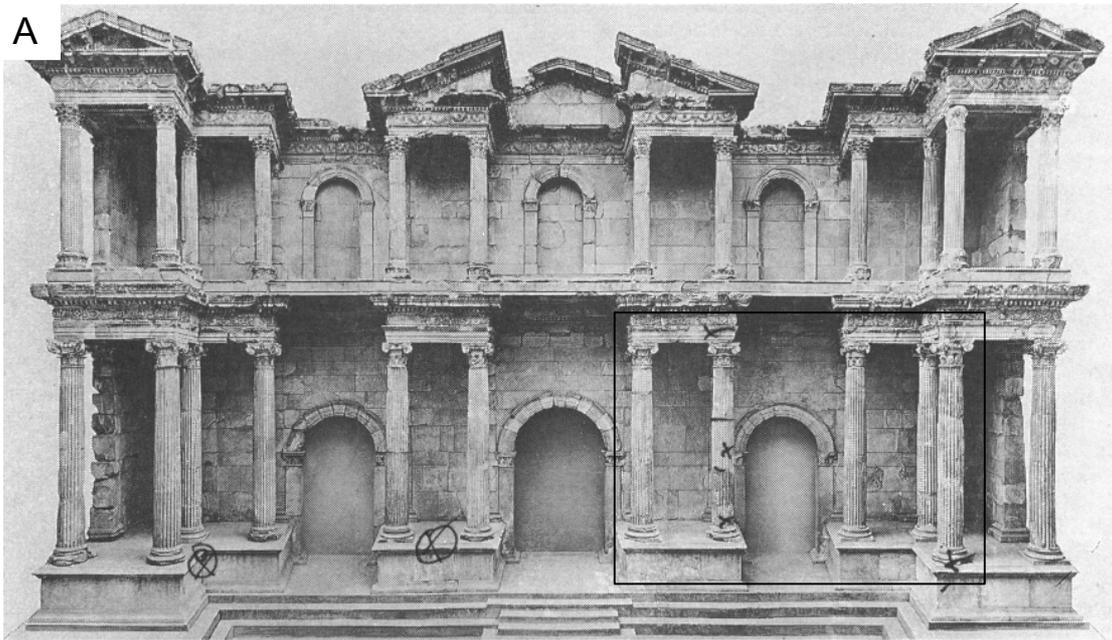


Fig. 1

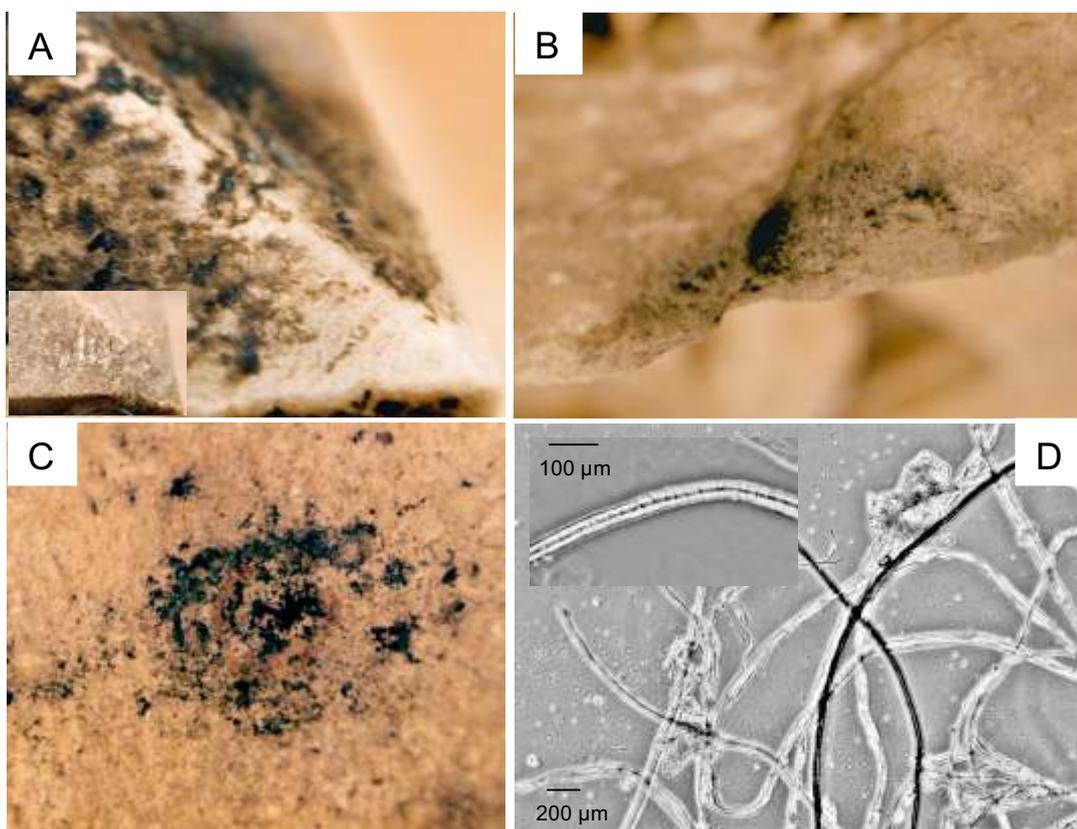


Fig. 2

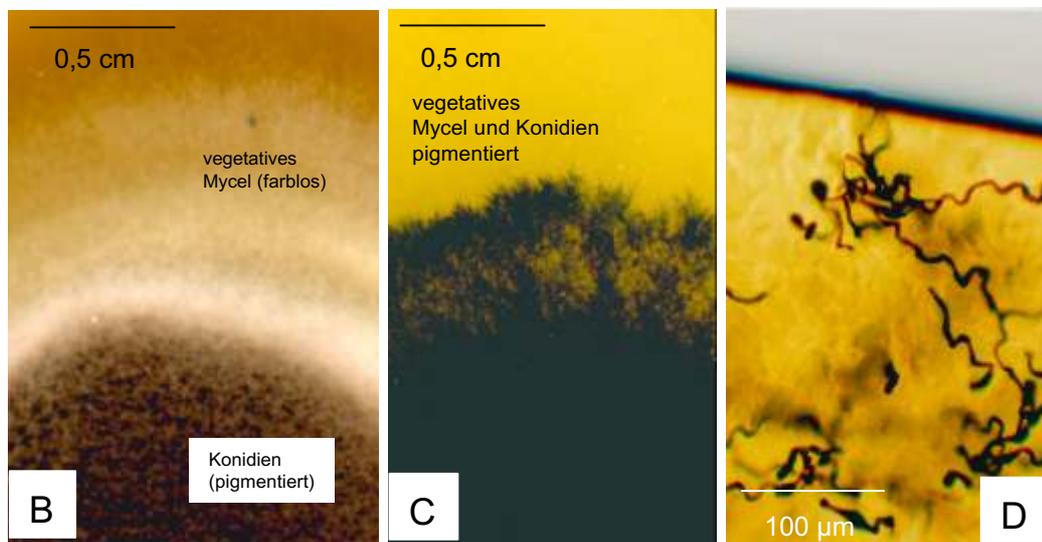
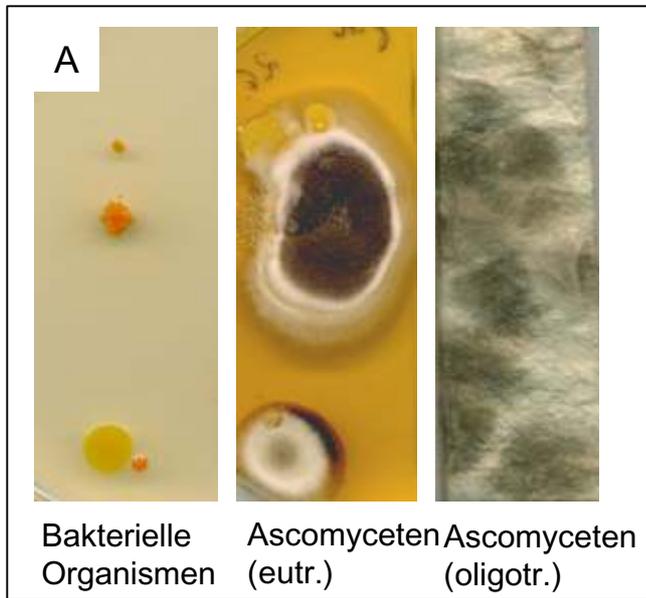


Fig. 3

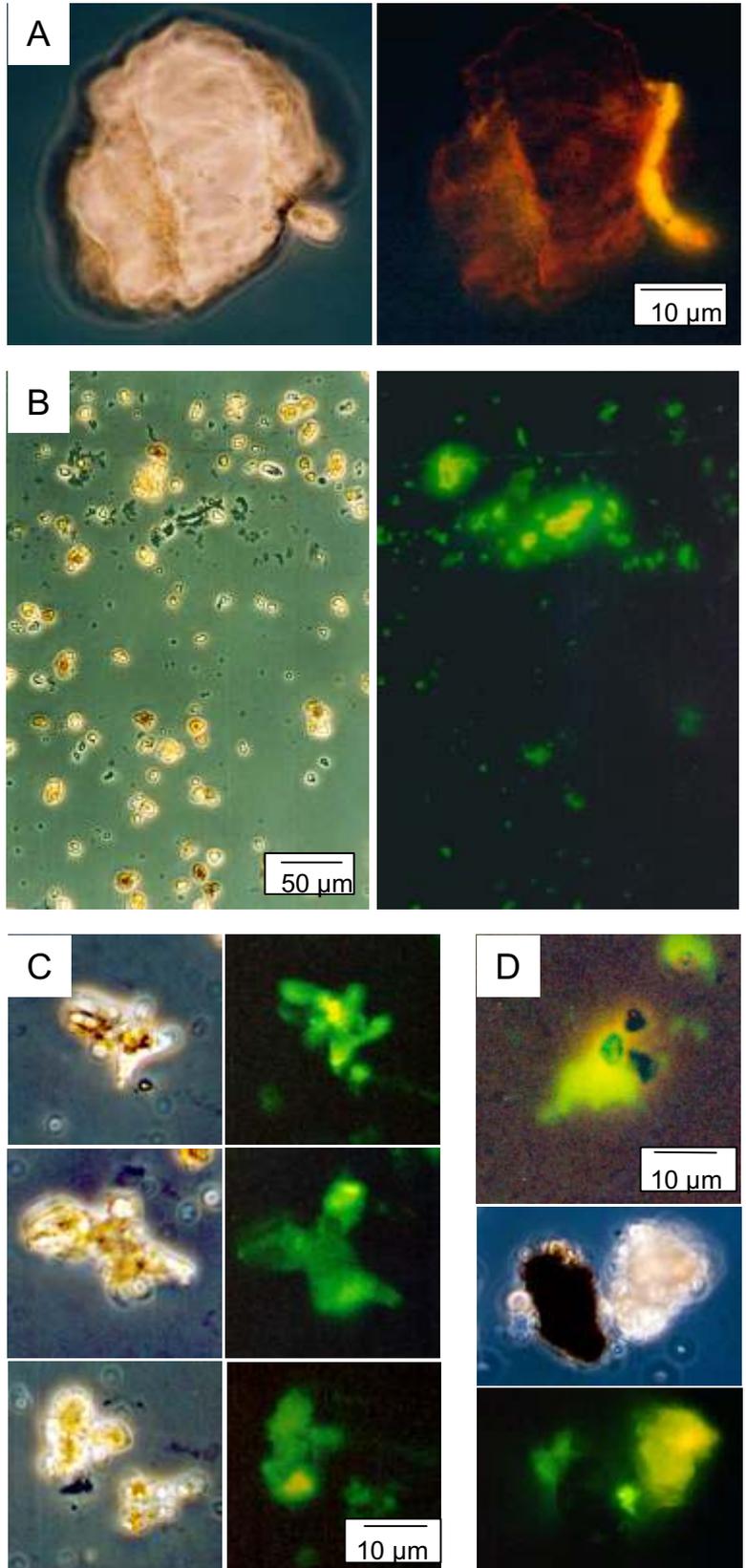


Fig. 4

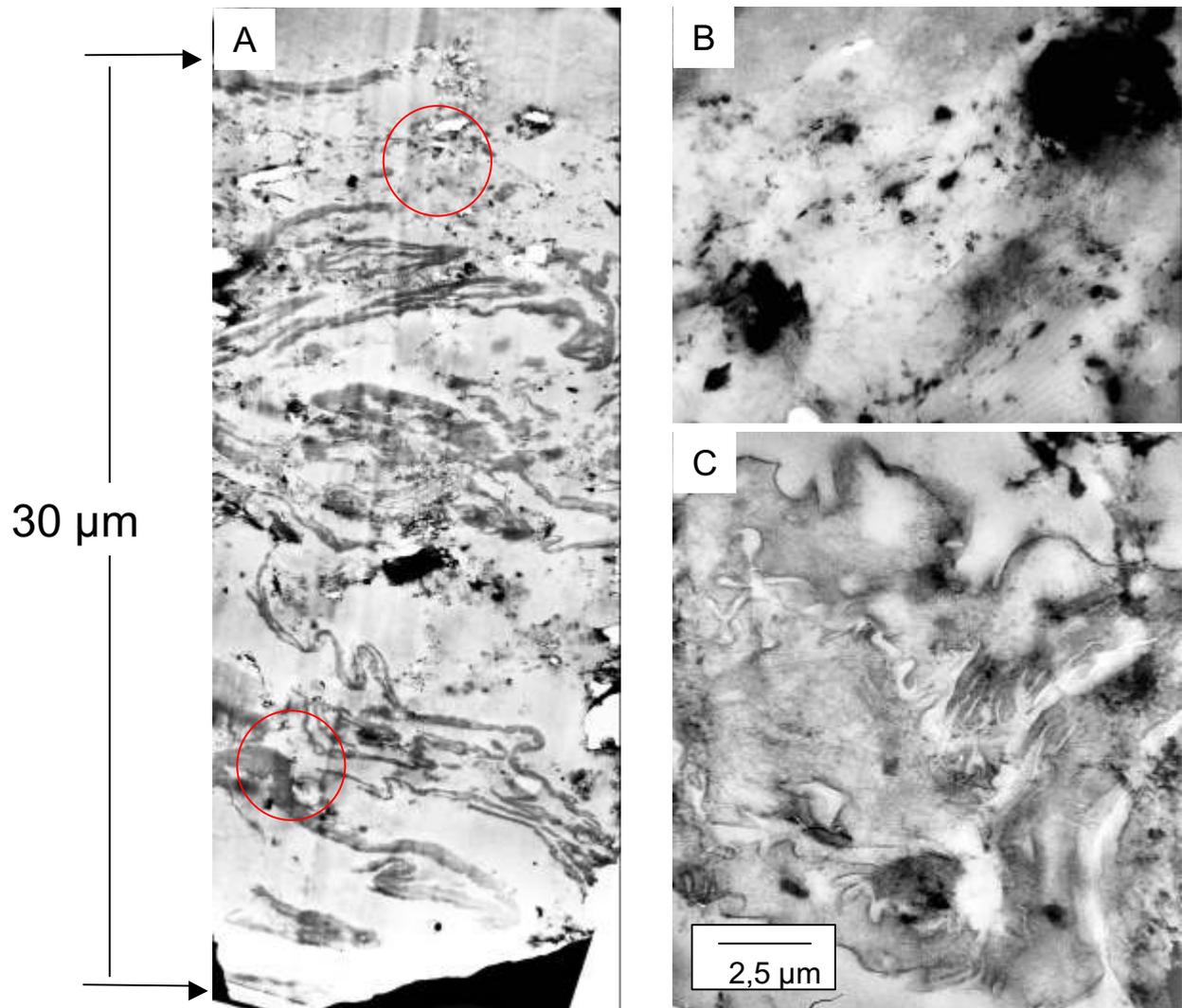


Fig. 5

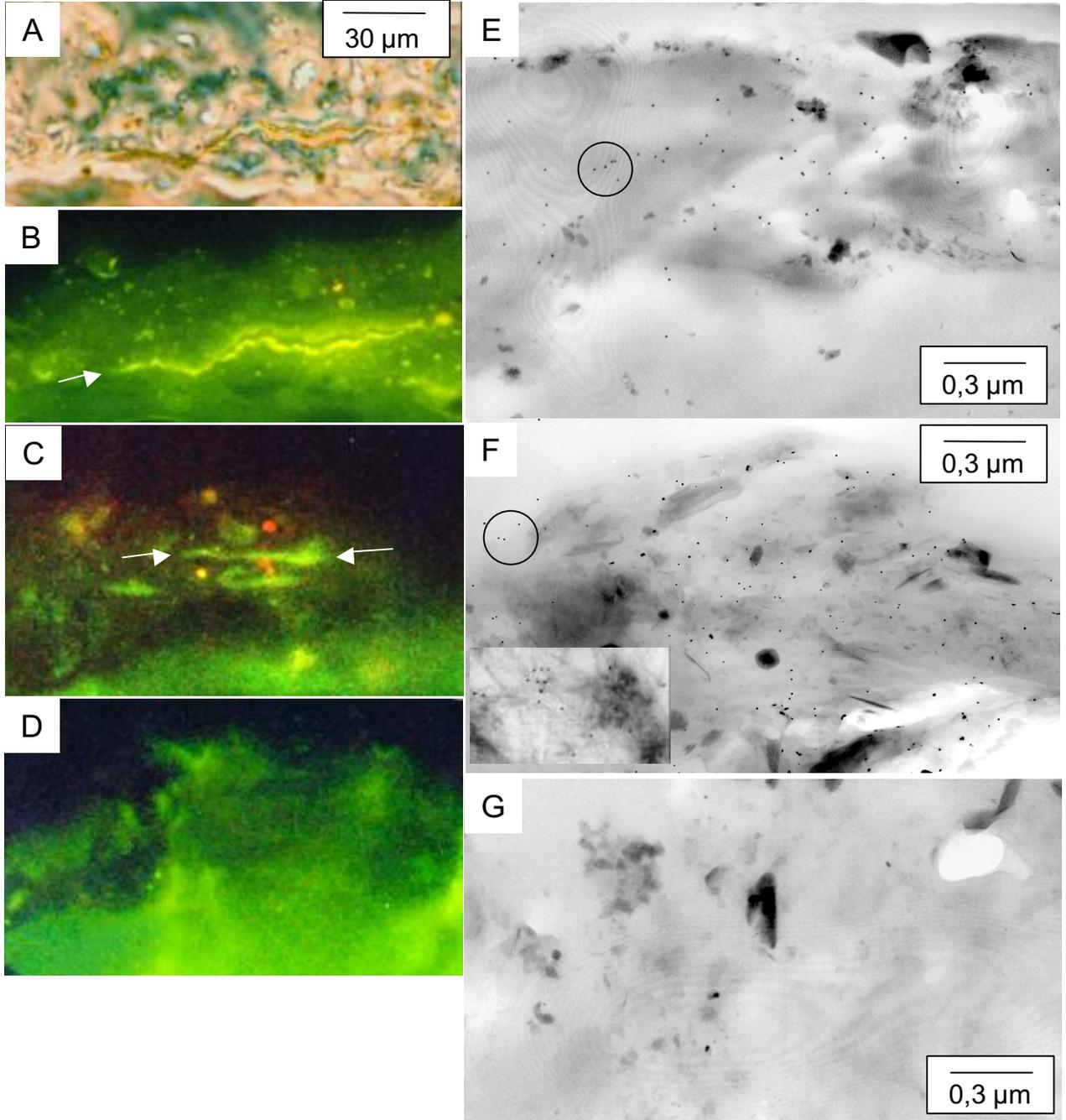


Fig. 6

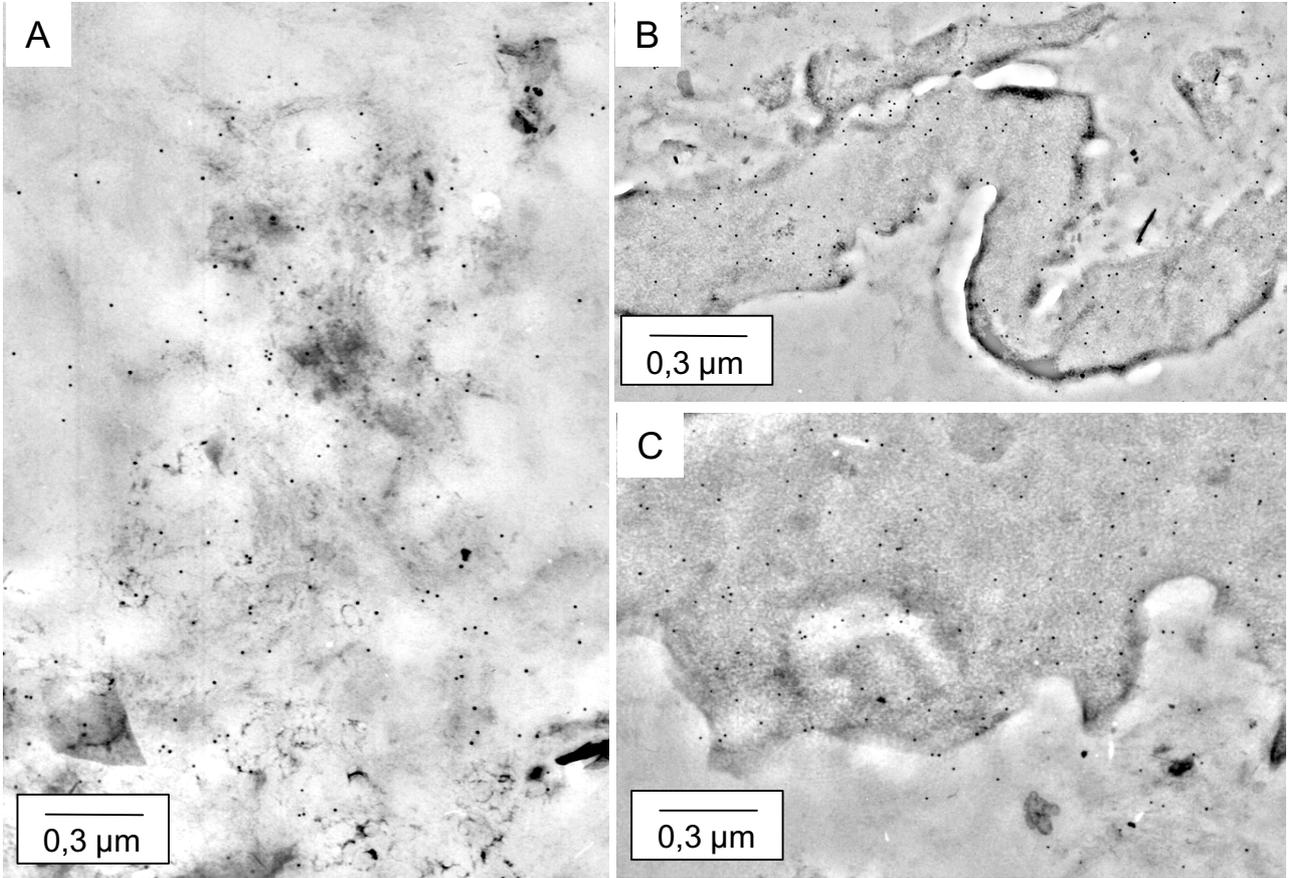


Fig. 7

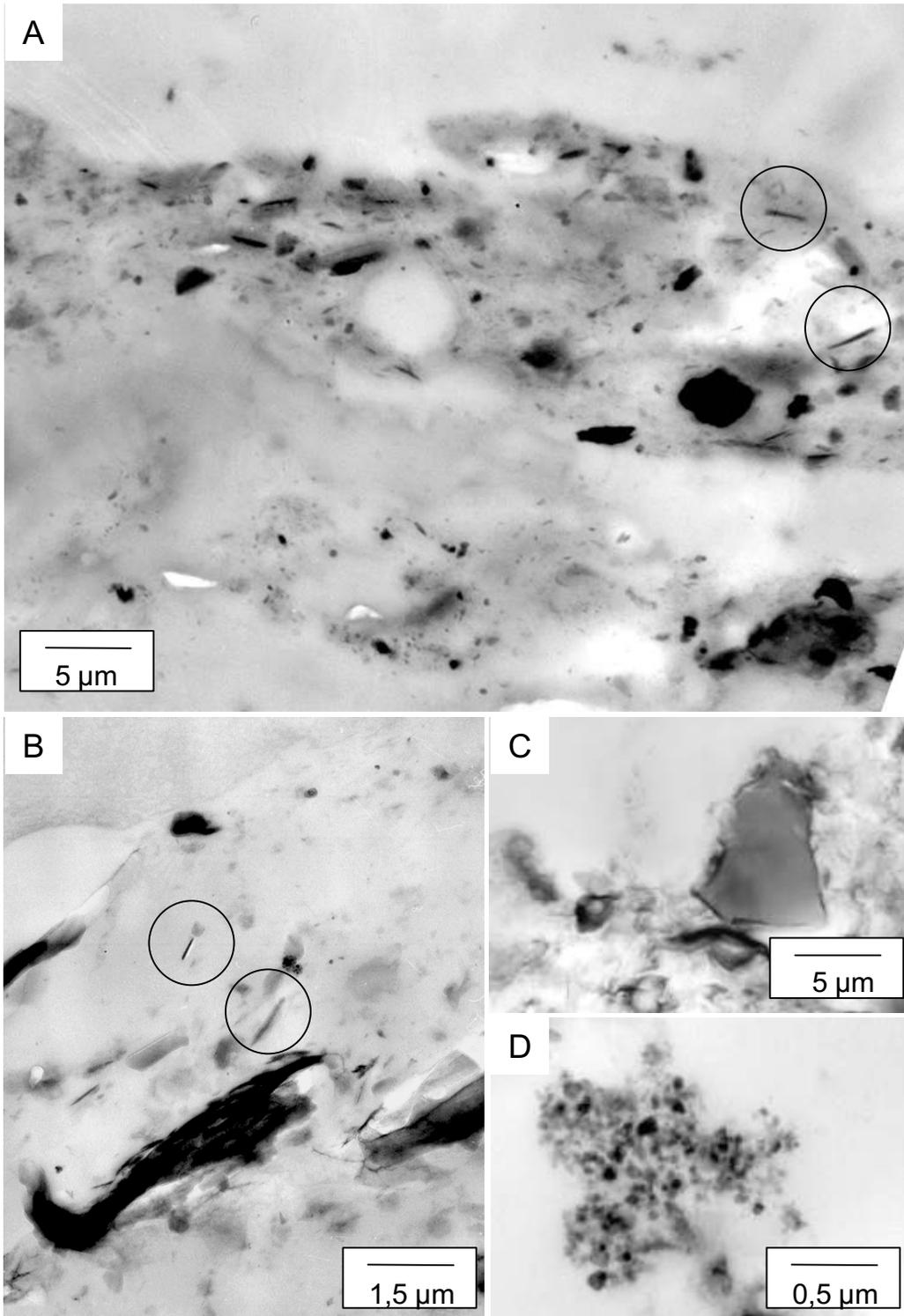


Fig. 8

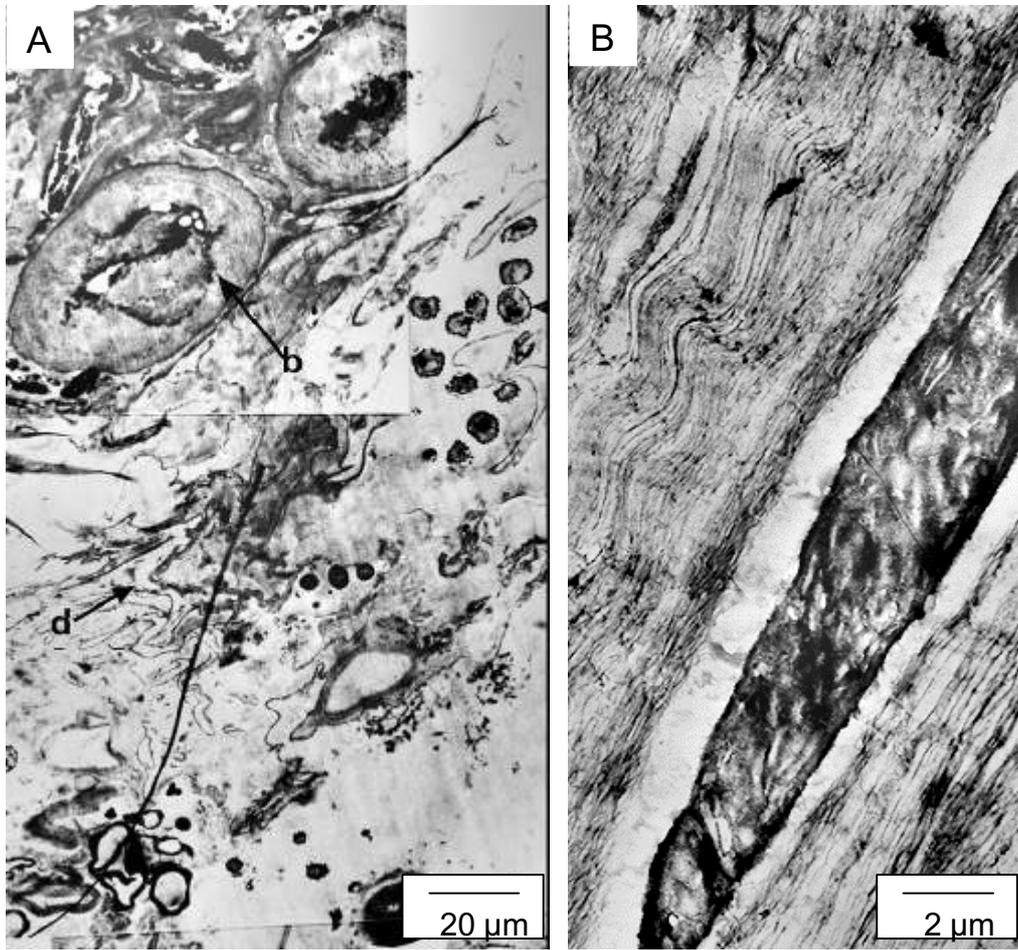


Fig. 9

## Potentielle Schadensmechanismen

## Auswirkungen

Eintrag von Partikeln und organischen Substraten

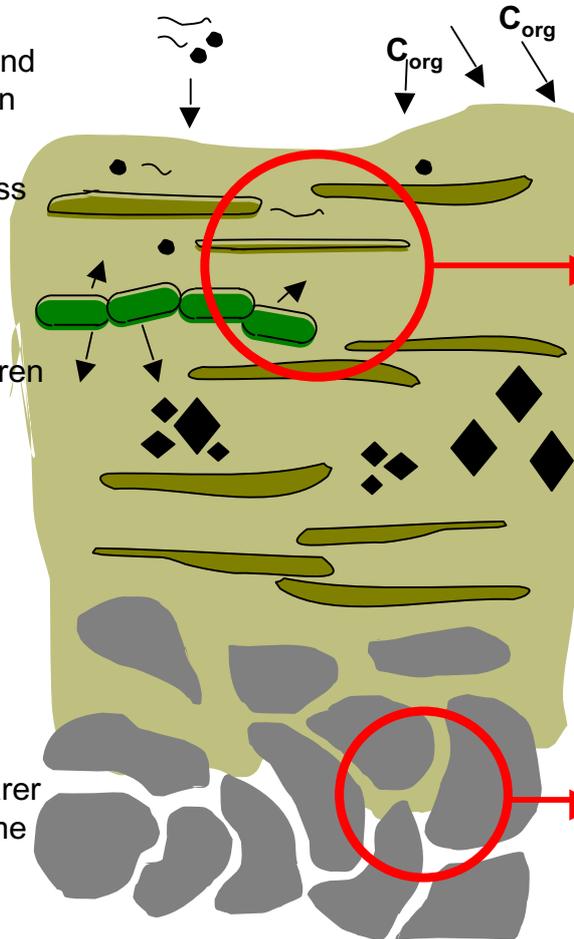
Anhaften und Einschluss von Partikeln

Bildung von extrazellulären Polymeren

Remineralisation

Herauslösen von Partikeln

Vordringen extrazellulärer Polymere in Porenräume



Verfärbung der Oberfläche

Bildung eines Belages

Destabilisierung der Materialoberfläche

Fig. 10