

## MATERIALIEN UND STOFFE

*Das Markttor von Milet im Berliner Pergamonmuseum erscheint in seinem baulichen Zustand zerbrechlich und ist in seinem Bestand gefährdet. Verantwortlich dafür sind Zerstörungen, gewaltsame Eingriffe und fehlerhafte Ergänzungen und Restaurierungen. In einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) finanzierten Projekt haben Wissenschaftler der Abteilung Strukturgeologie und Geodynamik der Universität Göttingen mit modernsten materialwissenschaftlichen und geologischen Prüfverfahren die Schäden begutachtet. Sie führten mineralogische und gesteintechnische Untersuchungen, Raumklimatemessungen, Schadenskartierungen und Mörtelanalysen durch. Ihre Arbeit dient dem Ziel, das Markttor von Milet unter Verwendung möglichst vieler Originalteile zu erhalten. Zu diesem Projekt gehört auch die Entwicklung speziell abgestimmter Mörtel und Steinersatzstoffe, die höchsten restauratorischen Anforderungen genügen.*

# Rettung für das Markttor von Milet

Schadensanalysen an Marmor, Mörtel und Stahl

**Siegfried Siegesmund, Joerg Ruedrich**

Wer um die Mitte des zweiten Jahrhunderts die Stadt Milet an der kleinasiatischen Westküste besuchte, konnte in der ionischen Metropole zahlreiche eindrucksvolle Gebäude bewundern. Den prachtvollen Zugang zum großen Südmarkt der Stadt, in der einst der Gelehrte Thales und der Philosoph Anaximander lebten, bildete das Markttor von Milet (Abbildung 1). Durch die drei Öffnungen dieses aus Marmor errichteten, prunkvollen und üppig verzierten Fassadenbaus strömten einst Händler und Käufer aus aller Welt, Neugierige und Müßiggänger. Es ist bisher nicht erwiesen, ob das Markttor einst für den Besuch Kaiser Hadrians in Milet im Jahre 129 nach Christus erbaut wurde, gesichert ist, dass neben dem schleichenden Verfall ein Erdbeben den Bau im zehnten oder elften Jahrhundert in Trümmer legte. Schließlich verschwand die Erinnerung an das prachtvolle Tor aus dem kulturellen Gedächtnis und war für Jahrhunderte unter der Schwemmbodenschicht begraben.

Die Architekturfragmente und Trümmer der zweistöckigen Markttorfassade wurden 1903 bei deut-

schen Grabungen in der Stadt Milet unter Leitung des Archäologen Theodor Wiegand (1864 – 1936) geborgen und konnten 1907 und 1908 nach Berlin überführt werden. In den Jahren 1925 bis 1929 wurde das Tor – bestehend aus insgesamt 750 Tonnen Marmorfragmenten – nach Vorlagen 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 (Strocka, 1981). Das Markttor von Milet ist ein einzigartiges archäologisches Baudenkmal. Seine Dimension und Bedeutung als Objekt im Inneren eines Museums ist außergewöhnlich. Es gehört zur Antikensammlung im Pergamonmuseum, welches seine Entstehung den kulturhistorisch wichtigen Ausgrabungen der Berliner Museen in Kleinasien, vor allem in Pergamon (Pergamonaltar), aber auch Magnesia, Priene und Milet verdankt. Die Berliner Museumsinsel mit all ihren Schätzen – darunter auch das Markttor von Milet – wurde 1999 von der UNESCO in die Weltkulturerbeliste aufgenommen.



Baustiltechnisch vereint das von Hubert Knackfuß auf die Zeit 120 bis 160 nach Christus datierte Tor Elemente der hellenistischen Bautradition – so beispielsweise das griechische Säulenproplyon –, mit der zeitgemäßen römischen Bauweise, sichtbar in der römischen Bühnenfassade. Auf einem 28,92 Meter breiten Unterbau erhebt sich mit zwei vorspringenden Seitenflügeln der symmetrisch gegliederte Sockel. Das in gleicher Art gegliederte Obergeschoss des Tores wird durch je-

weils vorgelagerte, paarweise angeordnete Säulen getragen. Die Säulen werden von Kompositkapitellen bekrönt. Den Übergang vom Unter- zum Obergeschoss bildet neben dem Architrav, dem Rankenfries und dem Gesims eine durchgehende, frei gespannte und reich gegliederte Kassettendecke. Das Tor erreicht seine maximale Höhe von 16,68 Metern im Bereich des Mittelgiebels (Kästner, 1992).

Während der Aufbaumaßnahmen in den 20er Jahren des letz-

ten Jahrhunderts wurden aus statischen Gründen alle Säulenschäfte, Kapitelle und Gebälke bis auf eine geringe Außenhaut ausgebohrt und im Inneren mit durchlaufenden Stahlstützen versehen sowie mit Beton ausgegossen (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 Ergänz-



Abbildungen: Siegfried Siegesmund, Joerg Ruedrich





Abbildung 2:  
Risse in den Säulen und  
Abplatzungen durch  
Bombentreffer

zungs- und Fugenmörtel aber auch Ziegel verwendet. Die Aufbaumaßnahmen sind im Einzelnen nicht dokumentiert oder überliefert, so dass zum Umfang und zur Art der Eingriffe an den Marmorfragmenten nur Mutmaßungen angestellt werden können.

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. Weitere Schäden entstanden durch Schrapnelle und

Splitter, wie Abplatzungen und Einschlagkrater am gesamten Baukörper zeigen. Erst nachdem bereits ein Winter vergangen war, konnte das Tor durch ein Notdach geschützt werden. Umfangreiche Restaurierungsmaßnahmen wurden 1952 bis 1954 durchgeführt und versetzten das Markttor in den heutigen Zustand. Auch hier sind die Maßnahmen nicht dokumentiert und es können nach Aktenlage keinerlei Aussagen über Umfang, Art und Qualität der Ausbesserungsarbeiten und der verarbeiteten Materialien gemacht werden.


In den letzten Jahrzehnten hat sich der bauliche Zustand des Markttores fortschreitend ver-

schlechtert und das Museumspersonal musste wiederholt spontan abgegangene Fragmente bergen. Infolgedessen wurde zum Schutz der Besucher ein Steinschlagnetz über die gesamte Front des Tores gespannt. Diese Situation ließ ein Aufschieben der dringend erforderlichen Sanierungsmaßnahmen nicht zu.

### Schadensaufnahme

Für die Schadenskartierung wurde eine repräsentative Achse durch das Baudenkmal ausgewählt, die exemplarisch alle bautechnischen Architekturelemente und den kompletten Materialbestand sowie das gesamte am Tor auftretende Schadensinventar erfasst. Unsere Kartierungsachse liegt darüber hinaus im Schnittstellenbereich einer durch einen Bombentreffer stark geschädigten Zone und einem durch den Zweiten Weltkrieg wenig geschädigten Bereich. Diese Normierung auf »Kriegsschäden« und »Nicht-Kriegsschäden« sollte Aufschluss darüber geben, inwiefern Veränderungen durch Umweltbedingungen – Innenraum, Besucheraufkommen, Materialunverträglichkeiten – oder durch den Bombentreffer verursacht wurden.

Zunächst wurde ein Schadensglossar über sämtliche am Tor auftretenden Baumaterialien und Schadensphänomene aufgenom-



**Nordwest-Krankenhaus Sanderbusch gGmbH**  
Hauptstraße  
26452 Sende  
Tel. 0 44 22. 80 0  
[www.sanderbusch.de](http://www.sanderbusch.de)

## Der Mensch steht im Mittelpunkt

Gesundheit ist das wichtigste Gut des Menschen. Sie zu erhalten oder wiederherzustellen haben wir uns zur Aufgabe gemacht. Das Nordwest-Krankenhaus Sanderbusch zeichnet sich durch ein modernes Leistungsangebot aus, das neueste Erkenntnisse und Methoden der Medizin mit den individuellen Bedürfnissen der Patienten verbindet.

Jährlich behandeln und betreuen wir rund 14.000 stationäre und mehr als 20.000 ambulante Patienten. Bei dieser großen und verantwortungsvollen Aufgabe bleiben wir stets unserer Leitlinie treu: Der Mensch steht bei uns im Mittelpunkt.

**Unser Leistungsspektrum**

- ▶ Zentrum für Innere Medizin
- ▶ Zentrum für Chirurgie
- ▶ Orthopädie
- ▶ Neurologie
- ▶ Neurochirurgie
- ▶ Anästhesiologie und Rettungsmedizin
- ▶ Gynäkologie und Geburtshilfe
- ▶ HNO
- ▶ Zentrum für Physiotherapie
- ▶ Seniorenbetreuung

Das Nordwest-Krankenhaus Sanderbusch ist KTQ<sup>®</sup>-zertifiziert (Kooperation für Transparenz und Qualität im Krankenhaus). Der Qualitätsbericht ist zu finden unter [www.kdq.de](http://www.kdq.de) oder kann unter der Telefonnummer 04422. 801004 angefordert werden.

men und in einer Datenbank für alle weiteren Projektschritte archiviert (vgl. Siegesmund et al. 2005). Folgende Schäden wurden unterschieden: Risse und Rissysteme, Kriegsschäden (Abbildung 2), Metallkorrosionen, konstruktionsbedingte Schäden, Verschmutzungen, Sinterschichten, Krusten, Mörtelschleier, Marmorabzuckerungen, mineralische Klebungen, Verfärbungen (Abbildung 3), defekte Fugen, Schalenbildungen, Gefügeflockerungen und Salzbelastungen. Die wichtigste Beobachtung der Materialverteilungskartierung betrifft die Oberflächen des Originalmarmors: Wir fanden Oberflächen mit antiken Oberflächenbearbeitungen und solche, wo diese komplett fehlen. Von der Antike bis in die Gegenwart sind demnach massive Oberflächenverluste aufgetreten. Auch wenn weite Bereiche des Markttors noch aus Originalmarmor bestehen, weist eben ein wesentlich geringerer Teil Originaloberflächen auf.

Die bekannten Aufbau- und Restaurierungsphasen des Markttors aus der Berliner Zeit werden durch die Ergebnisse der Materialkartierung rekonstruiert und detailliert aufgelöst. So konnte der ersten Aufbauphase in den 20er Jahren des letzten Jahrhunderts ein qualitativ hochwertiger Restauriermörtel zugeordnet werden. Er besteht unter anderem aus einem weiß-milchigen kristallinen Zuschlag, bei dem es sich um Marmor­mehl handeln könnte. Sollte sich das bestätigen, so liegt die Vermutung nahe, dass das Marmor­mehl bei den Ausbohrarbeiten anfiel und gleich weiterverarbeitet wurde. Da dieser Restauriermörtel vergleichsweise geringe Schädigungen aufweist, scheint ein zukünftiger Einsatz eines vergleichbaren Materials bei späteren Restaurierungsmaßnahmen sinnvoll. In diesem Zeitraum kam ein ebenfalls qualitativ guter Kalkfugenmörtel zum Einsatz. Einige am Tor fehlende Kapitelle



Abbildung 3:  
Alte Schutzanstriche im Bereich der Kapitelle führen zu deutlichen Verfärbungen

wurden komplett durch Gipsabgüsse ersetzt, die sich am Original orientierten. Den 50er Jahren wurden – in deutlicher Abgrenzung zu den oben genannten Materialien im Fugen- und Restauriermörtelbereich – im Verhältnis qualitativ einfache Zementmörtel zugeordnet. Auch die schlechte Ausführung der Antragungen unterscheidet sich von denen der früheren Restaurierungsphase deutlich. So wurde beispielsweise weitflächig Zementmörtel verwendet.

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 die verwitterte Stein­oberfläche angewachsen (Abbildung 4). Auffallend ist, dass die Sinterschichten fahnenartig unterhalb feiner Haarris­se auftreten. Aufgrund der Ausprägung und Morphologie der Anlagerungen kann davon ausgegangen werden, dass es sich um Auswaschungen



Abbildung 4:  
Mörtelschleier und Sinterbildungen sind ein allgegenwärtiges Problem



von Bindemitteln handelt. Die Sinterbildungen weisen auf die erhöhte Feuchteinwirkung hin, die vermutlich auch die Korrosionen der Bewehrungen verursachte. Das Markttor weist deutliche strukturelle Schäden auf, die wahrscheinlich auf Verformungen zurückzuführen sind, wie zum Beispiel Risse in den Verbindungen zwischen Betonplatten und Marmorverkleidungen sowie an den Säulenfüßen auf den Stahlbetonplatten. Druck aus der Mitte der Säulen hat offensichtlich auch zu Abplatzungen an einigen Säulen geführt. Verformungsmessungen über die Risse (Abbildung 5) in einem Zeitraum von sechs Monaten lassen erkennen, dass die Maximalverformungen über den Rissen im Bereich von 0,21 Millimetern pro Meter liegen.

Wie Abbildung 6 zeigt, treten an statisch brisanten Stellen wie beispielsweise an den in die Rückwand greifenden Gebälken massi-

ve, umlaufende, bis zu mehreren Zentimetern mächtige Risse auf. Flächig nach unten orientierte Mörtelschleier sind an Rissysteme vor allem im Gebälk und an die Säulen gekoppelt. Durch Dübel und mineralische Mörtel fixierte Originalmarmorbruchstücke werden zum Teil nur noch durch Verspannung gehalten. Starke Gefügeschäden treten auch an den reich verzierten Ornamenten des Gebälkes, den Kapitellen sowie an den Kannelurstege der Säulen auf. Hier tritt ein Masseverlust durch »Abzuckern« der oberen Kornlagen auf. Am gesamten Markttor sind außerdem rostende Eisenteile zu sehen, die bereits Schäden wie Rostsprengung und Verfärbung durch Rostläufer verursacht haben.

Auch Organismen, die anorganische oder organische Säuren produzieren, verursachen Krusten- und Patinabildungen und andere Schäden. Während der Anteil der

so genannten bakteriellen koloniebildenden Einheiten (CFU) in der Raumluft nur drei bis vier Prozent betrug, wurden in Abdrücken von der Oberfläche des Gesteins circa 40 Prozent pilzliche CFU gefunden. Auf stark mit Staub belasteten Oberflächen lag der Anteil pilzlicher CFU bei rund 20 Prozent. Insgesamt stellen wir fest, dass sich Biofilme unter der kontrollierten Atmosphäre eines Innenraumes sehr langsam entwickeln, solange die Oberflächen nicht durchfeuchtet sind. Im Falle des Markttores von Milet wird die Gesteinsoberfläche des Bauwerkes durch den Biofilm in zweifacher Hinsicht beeinträchtigt: erstens durch die Pigmentierung der Oberfläche und zweites durch das Herauslösen oberflächenparalleler Partikel. Der Umfang der Schadwirkungen betrifft allerdings nur die Oberfläche bis in eine Tiefe von maximal 100 Mikrometern ( $\mu\text{m}$ ).



Abbildung 5:  
Dehnungsmesser  
zur Überprüfung der  
Bewegungen an  
statisch brisanten  
Rissen

Die Gesamtbewertung der Schadenskartierung kann wie folgt zusammengefasst werden, wobei die Kartierung eine räumliche Verbreitung der in der Musterfläche vorkommenden Phänomene wiedergibt: Es ist eine deutliche Schadenskonzentration an signifikanten Stellen zu beobachten. 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 Marmoritatomörtel der 20er Jahre über deutlich weniger Schäden wie Abplatzungen, Schalenbildungen und Ausbrüche verfügt. Dies steht im Gegensatz zu den Restaurierungsphasen der 50er Jahre. Es ist deutlich geworden, dass das Markttor von Milet ein massives, multiples Schadensbild aufweist, welches ein zügiges Handeln erforderlich macht.

### Der Marmor

Die besonders wertvollen Anteile am Markttor sind die ursprünglich verbauten Marmoranteile. Da für eine dem Bauwerk angepasste Sanierung dieser Materialien die Kenntnis des Erhaltungszustandes, aber auch die der mineralogischen Zusammensetzung und der Gefügeausprägung von entscheidender Bedeutung ist, konzentrierten sich die Forschungsarbeiten auf die vor fast 2.000 Jahren bearbeiteten Marmorobjekte. Anhand makroskopischer Untersuchungen konnten zwei grundlegend unterschiedliche Gesteinstypen gegeneinander abgegrenzt werden. Hierbei handelt es sich um einen vorwiegend undifferenzierten und einen unregelmäßig gebänderten Marmor, wobei beide Typen fast reine Calcit-Marmore repräsentieren. Insgesamt ist die dominante Verwendung des vorwiegend undifferenzierten Marmorartyps für das gesamte Markttor von Milet charakteristisch.



Abbildung 6: Rissbildungen und Auflockerungszonen in konstruktiv brisanten Positionen

Dieser vorwiegend undifferenzierte Marmor hat eine grauweiße Farbe mit vereinzelt dunkelgrauen Bändern, die isoliert vorkommen und die Foliation nachzeichnen. Die Korngröße der einzelnen Calcit-Kristalle beträgt circa 1,5 Millimeter, womit dieser Marmor mittelkörnig ist. Neben der Bänderung können verschiedene, nur lokal verbreitete Gefügemerkmale einer späten geologischen Überprägung beobachtet werden. Hierzu zählen mit hellroten Mineralisaten verfüllte Risse sowie Mineralnester. Letztere sind zumeist taschenförmig ausgebildet und ebenfalls mit feinstkörnigen rötlichen Verwachsungen gefüllt.

Der unregelmäßig gebänderte Marmor repräsentiert ein stark

strukturiertes Gestein und ist durch einen ausgeprägten Lagenbau gekennzeichnet. Der Marmor weist makroskopisch ein weißes bis weißgraues Erscheinungsbild auf. Wesentliches Gefügemerkmal ist eine deutliche Bänderung, welche hier ebenfalls die Foliation nachzeichnet. Hierbei können zwei unterschiedliche Arten von Materialwechslern beobachtet werden. Zum einen handelt es sich um schwach gelbliche bis leicht rötliche, zum anderen um hellgraue bis graue Lagen. Zwischen diesen Bändern ist der Marmor zumeist weiß. Die mittlere Korngröße beträgt nach makroskopischen Beobachtungen circa 0,5 Millimeter. Somit ist der Marmor als feinkörnig zu bezeichnen.

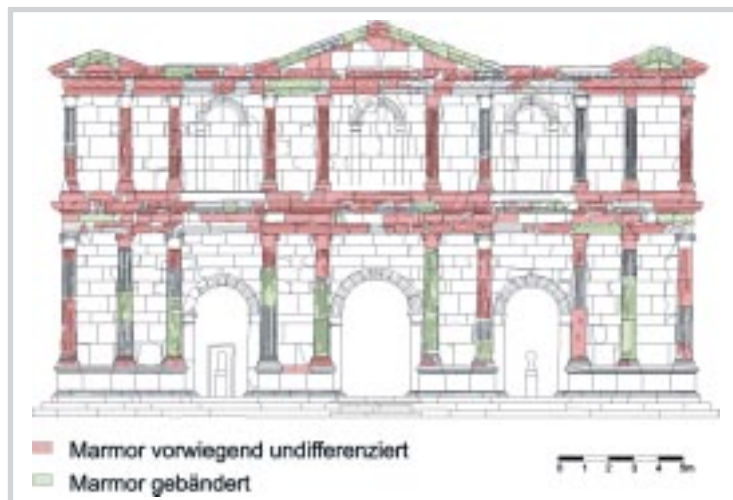


Abbildung 7: Die Karte zeigt die Verteilung der beteiligten Marmorarten am Markttor



Hinsichtlich der 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 Verfügbarkeit der unterschiedlichen Marmore aufgrund von Abbauphasen im Steinbruch zurückzuführen ist (Abbildung 7). Auffällig ist allerdings, dass es eine gewisse Anordnung der Marmortypen in Giebelbereichen gibt und dass für Säulenschäfte der oberen Ordnung, Säulenkapitelle und Säulenbasen generell der vorwiegend undifferenzierte Marmortyp verwendet wurde. Hingegen weisen die Säulenschäfte der unteren

ausgebohrten Marmorsäulen wurden Ziegelformsteine eingebracht. Der Zwischenraum von Marmor und Ziegel wurde mit einem Kalkmörtel vergossen. Um eine größere Stabilität des Tores zu erreichen, sind in der Mitte der Säulen Stahlkreuzstützen eingebracht worden. Die restlichen Zwischenräume wurden mit Zementmörtel vergossen. Die weißen Deckschichten, die in den 20er Jahren verwendet wurden, zeigen einen Kalkmörtel, bei dem sowohl das Bindemittel als auch der Zuschlag fast ausschließlich aus Kalk und/oder Dolomit besteht. Der Siliziumdioxid-Anteil ist mit 4,7 bis 6,2 Prozent relativ gering und befindet sich im abgedundenen

Jahren 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 bis 0,63 Millimeter). In den hydraulischen Bindemitteln wurden deutliche Gehalte von Calciumsilikathydraten und Zementklinkerresten nachgewiesen. In den Poren sind vereinzelt Ettringitkristalle feststellbar (Abbildung 9).

## Das Raumklima

Die Verwitterung von Baumaterialien wird zu einem großen Teil durch die Umweltbedingungen, denen sie ausgesetzt sind, gesteuert. Viele der Schäden am Markttor sind zumindest mittelbar an Klima-Variationen wie beispielsweise Temperatur, relative Feuchte und Taupunktunterschreitungen gekoppelt. Es ist demnach von Bedeutung, ob und inwieweit die derzeitigen Innenraum-Umweltbedingungen den fortschreitenden Verfall begünstigen. Nicht unerheblich ist möglicherweise die Belastung durch Besucher vor dem Hintergrund, dass durchschnittlich 6.000 Menschen am Tag mit Spitzenwerten von rund 20.000 Personen pro Tag das Markttor von Milet besichtigen und damit die Innenraumatmosphäre erheblich beeinflussen. Zur Wechselwirkung zwischen Besuchern und Ausstellungsobjekt gibt es in der Literatur keine ausreichenden Daten.

Ein weiterer Faktor, der die besondere klimatische Situation im Innenraumbereich kontrolliert, sind die Belüftungskanäle in den Museumswänden des Pergamonmuseums, die mit Schuttresten aus dem Zweiten Weltkrieg verfüllt und infolgedessen defekt sind. Zudem hat sich das ehemals aus Milchglas bestehende weiß



Abbildung 8: Aktueller Aufbau der Säulen des Markttors von Milet mit (a) ausgebohrtem Säulenrest des Markttors und b) schematischem Aufbau der Marmorsäulen am Gebäude mit Metallstützkonstruktion im Zentrum, umgeben von Beton, Ziegel und Kalkmörtel sowie äußerem Rand aus Originalmarmor (Mit freundlicher Genehmigung durch Dr. M. Pfanner)

Ordnung eine sehr ungeordnete Verteilung der Marmortypen auf. Dies gilt ebenfalls für den Architrav und die Frieße, wobei hier der vorwiegend undifferenzierte Marmortyp dominiert.

## Die Mörtel

Um die am Markttor verwendeten Mörtel zu analysieren, wurden gezielt an unterschiedlichen Gebäudeteilen Bohrkerne entnommen, so dass Proben von allen eingesetzten Baustoffen wie Marmor, Mörtel und Ziegel untersucht werden konnten (Middendorf et al, 2004). Der derzeitige Aufbau einer »originalen« Marmorsäule ist in Abbildung 8 dargestellt. In die

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 mit eckigen Kornformen. Die Korngröße befindet sich im Bereich von Mittelsand (0,2 bis 0,63 Millimeter). Das Bindemittel besteht aus einem schwach hydraulischen Kalk. Die Kalkmörtel aus dem Wiederaufbau in den 50er

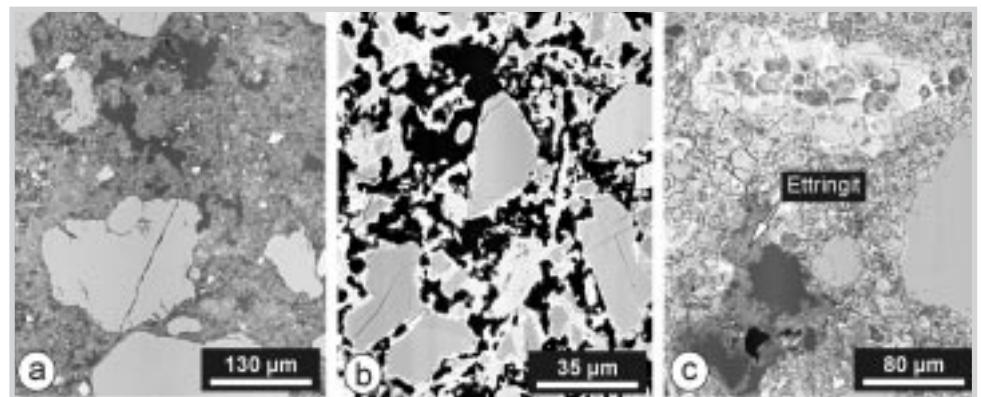
getünchte Glasdach mit der Zeit verdunkelt. Bei direkter Sonnenbestrahlung wird der Innenraum zusätzlich aufgeheizt. Aus verschiedenen wissenschaftlichen Untersuchungen ist bekannt, dass gerade Marmor sehr sensitiv auf steigende Temperaturen und variierende Feuchtigkeit reagiert (Siegesmund et al. 2000). Da im Pergamonmuseum bisher keine langfristigen und detaillierten Klimadaten vom Innenraum erhoben wurden, besteht hier vor dem Hintergrund der Beurteilung von wirksamen Kapillarkräften und Mobilisation etwaiger im Mauerwerk enthaltener Salze großer Forschungsbedarf. Zudem bildet eine entsprechende Datenbasis die Grenzwerte für Materialverträglichkeitsprüfungen. Damit Klimamessungen überhaupt einen Aussagewert besitzen, muss die Dauer der Messungen alle zu erwartenden, extremen Klimazustände, wie Jahreszeiten oder Spitzenbesucherströme, umfassen.

Um die Auswirkungen des Innenraumklimas auf das Bauwerk möglichst detailliert bewerten 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 von Innenklima und Außenklima beurteilen zu können.

Die Messungen fanden im Zeitraum vom 11. April 2002 bis zum 20. November 2003 statt.

Für die im Museum gemessenen Raumtemperaturen bestehen jahreszeitliche Temperaturschwankungen von insgesamt rund zehn Grad Celsius, wobei Spitzenwerte von maximal 30 Grad Celsius im Sommer registriert wurden. Die Innentemperatur des Museums hängt hauptsächlich von der Außentemperatur ab. Teilweise

Abbildung 9: Elektronenmikroskopische Aufnahmen der verschiedenen, am Markt für Millet verbaute Ersatzmaterialien Kalkmörtel (a), Ziegel (b) und Beton (c)



## GeoMaSEK: Geowissenschaftliche Materialforschung zum Schutz und Erhalt von Kulturgut

(red.) Eine Vielzahl von Kulturgütern, vor allem historische Gebäude, Denkmäler und Skulpturen, bestehen aus Geomaterialien, darunter Naturstein, Ziegel, Mörtel und Keramik. Durch Witterungseinflüsse, Umweltverschmutzung und menschliche Einwirkungen sind diese Kulturgüter häufig in ihrem Bestand gefährdet. Geowissenschaftler und Baustoffexperten der Universitäten Göttingen, Kassel und Kiel haben sich zu dem Forschungsverbund »Geowissenschaftliche Materialforschung zum Schutz und Erhalt von Kulturgut« (GeoMaSEK) zusammengeschlossen, um Erkenntnisse und Forschungsinteressen aus den Geo-

wissenschaften mit den Materialwissenschaften und der Bautechnologie zu verknüpfen. Ziel des Zentrums ist es, konkrete Projekte zur Erhaltung von Kulturgütern und historischer Bausubstanz zu bearbeiten und die geowissenschaftliche Materialforschung als Arbeits- und Forschungsgebiet zu etablieren. Damit eröffnen sich für Geowissenschaftler über ihre klassischen Tätigkeitsgebiete hinaus Arbeitsmöglichkeiten in anwendungsbezogenen Bereichen.

An dem Verbund GeoMaSEK sind rund 20 Wissenschaftler beteiligt. Fragen der Baustoffkunde und Schadensanalyse von Bauschäden werden dabei vorwie-

gend von der Universität Kassel bearbeitet; die Geowissenschaftler der Universität Göttingen bringen ihre Expertise in den Bereichen Natursteine und chemisch-physikalische Analytik ein. Zum Profil von GeoMaSEK gehört neben der Förderung von Nachwuchswissenschaftlern durch Promotionsprojekte auch die Fortbildung von Architekten, Restauratoren und Handwerkern. Sie werden zudem bei der Beurteilung und Schadensanalyse von gefährdeten historischen Bauwerken unterstützt. Leiter des Verbundes GeoMaSEK ist der Göttinger Geowissenschaftler Prof. Dr. Siegfried Siegesmund.



reagiert die Innentemperatur um wenige Tage verzögert zur 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 in der Öffnungszeit von 10 bis 18 Uhr jeweils für Besuchstage und Ruhetage 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 beispielsweise bei einer Außentemperatur von zehn Grad Celsius ergibt Temperaturen von 20 bis 27 Grad. Auch bei einer Außentemperatur von 30 Grad sind 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.

Im System von Naturstein und Mörtel könnte die Luftfeuchtigkeit ebenfalls von kritischer Bedeutung sein. Die relative 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, weist ebenfalls keine signifikante Beeinflussung auf. 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.

Um einen Eindruck über die gesamte mikrobielle Belastung

der Raumluft im unmittelbaren Umfeld des Marktores zu gewinnen, wurden außerdem noch die Keimzahlen in der Raumluft und auf der Objekt Oberfläche bestimmt (Hoppert, 2003). Die Zahl der bakteriellen koloniebildenden Einheiten variiert zwischen 700 (in 3 und 1,5 Metern Höhe) und 2.800 (auf dem Boden) pro Kubikmeter Raumluft. Damit liegt der Anteil bakterieller Organismen etwa fünffach 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, zum Beispiel eine durch Klimatisierung, viel Publikumsverkehr oder äußere Witterungsbedingungen hervorgerufene hohe Luftfeuchtigkeit. Da Luftkeime und Sporen in der Regel an (größere) Staubpartikel adsorbiert sind, ist die Keimzahl auch immer ein direkter Ausdruck für die Gesamtbelastung an Aerosolen in der Raumluft.

### Rekonstruktionskonzepte

Für die geplanten Sanierungsarbeiten am Markttor von Milet wurden in Zusammenarbeit mit Dr. Bernhard Middendorf, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens an der Universität Kassel, speziell abgestimmte Restauriermörtel entwickelt. Hierbei wurde auf die physikalisch-mechanische und chemisch-mineralogische Anpassung des Restauriermörtels an die vorhandenen Marmore des Marktores besonderer Wert gelegt, da zahlreiche originale Marmorteile unter anderem durch den Einsatz ungeeigneter Mörtel zerstört oder geschädigt worden sind.

Die Mörtelfestigkeit des Restauriermörtels muß 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 von Mörtel und 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 Calciumhydroxid muss jedoch im Mörtel enthalten sein, um den Stahl vor Korrosion zu schützen. Der Mörtel soll außerdem nicht dazu neigen, Wasser abzusondern, da das Eindringen der Porenlösung in den Marmor Verfärbungen oder auch die Zerstörung der Korn/Korn-Bindungen zur Folge haben könnte. Gleichzeitig ist ein Selbstverdichtungseffekt des Mörtels wünschenswert, um während des Einbaus die Säulen nicht zusätzlich belasten zu müssen.

Die Verträglichkeit der entwickelten Mörtel mit den im Bestand vorhanden Steinerfüllstoffen gilt auf der Basis der durchgeführten Untersuchungen als gesichert. Die entwickelten Mörtel sind optimal den geforderten physikalisch-mechanischen und den chemisch-mineralogischen Anforderungen angepasst worden und können am Markttor bedenkenlos eingesetzt werden. Die Mörtel aus der Kombination von Puzzolanen, Weißzement, definiert zusammengesetzten Zuschlägen (Quarzsand, Kalksteinmehl) und chemischen Additiven sind kompatibel mit den Marmoren des Marktores von Milet. Ferner sind sie ausreichend alkalisch, um den Stahl vor Korrosion zu schützen. Die Verfärbung des dolomithaltigen Marmors 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 Restaurierung

Inzwischen sind Prof. Dr. Michael Pfanner und Diplom-Ingenieur Johannes Pfanner (ARGE Pfanner) mit der Planung der Restaurierung der Antikensammlung des Perga-

mon museums im Auftrag der Staatlichen Museen zu Berlin/Stiftung Preußischer Kulturbesitz und des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung (BBR) betraut. Auf der Basis der in Göttingen wissenschaftlich betreuten Voruntersuchungen wird das Marktortor dazu abgebaut werden müssen. Alle Einzelteile werden in einer Werkstatt restauriert und danach wieder nach antiken Vorbild aufgebaut. Das »Eisenskelett« von 1928/1929 wird nicht komplett entfernt, aber seine schädigende Wirkung beendet. Ein zweites Ausbohren der Säulen hätte die massive Schädigung der restlichen antiken Marmoroberflächen zur Folge. Die derzeitigen statischen Zwängungen werden durch flexible Anschlüsse beseitigt. Das Konzept sieht weiterhin vor, dass lediglich eine zurückhaltende Reinigung der originalen Oberflächen zum Schutz der noch existenten antiken Patina durchgeführt wird. Alle Arbeiten werden durch die Restauratoren so ausgeführt, dass sie reversibel sind, damit alle Verbindungen und Anschlüsse jederzeit wieder zerstörungsfrei gelöst werden können. ◀

#### Literatur:

Hoppert, M., 2003. Marktortor von Milet: Schädigung durch Biofilme. In: Das Marktortor von Milet: Schadensanalyse und modellhafte Sanierungskonzepte, DBU-Abschlussbericht.

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

Middendorf, B., Siegesmund, S., Maack, V., Müller, K. & Rüdlich, J. 2004. The Market Gate of Milet of the Pergamon Museum Berlin-Deterioration characteristics and mortar development for restoration purposes. In: 10th Int. Congress on deterioration and conservation of stone, 1073-1080.

Pfanner, M., Pfanner, P. & Fendt, A. 2005: Der Titusbogen in Rom, das Siegestor in München, das Marktortor von Milet in Berlin – Wie restauriere ich einen Triumphbogen richtig. In: Siegesmund, S., Auras, M. &

The indoor exhibit of the Market Gate of Milet is a unique archaeological monument. After the excavation of the gate in 1903, it was rebuilt in 1925 in the Berlin Pergamon Museum, incorporating the remaining original marble fragments. The reconstruction of the gate was carried out in such a way that most marble fragments were first removed, leaving three to four centimetre thick cored marble columns. These cored columns were then mounted on a steel construction and filled with different mortars or specially shaped brick blocks combined with mortar.

During World War II the monument was severely damaged by aerial bombardment. But the rapid decay and observed deterioration phenomena seem to be due to indoor atmospheric effects and also to the combining of incompatible materials (e.g. marble, steel, mortar, concretes, bricks etc.). The Market Gate is now to be totally restored, which means that it will be dismantled and later rebuilt. Pre-investigations to characterize the building materials and the structural conditions are being supported by the German Environmental Foundation (DBU).



*Prof. Dr. Siegfried Siegesmund, Jahrgang 1955, ist seit 1990 in der Abteilung Strukturgeologie und Geodynamik des Göttinger Zentrums für Geowissenschaften an der Universität Göttingen tätig. Die Forschungsschwerpunkte des Geologen sind regional- und strukturgeologische Studien in den Ostalpen und der Antarktis, im südlichen Afrika, Argentinien und Uruguay. Außerdem beschäftigt er sich im Bereich der Angewandten Geowissenschaften sowie der Geomaterial- und Industrieforschung mit Transportprozessen in Erdölreservoirs, Schadstoffendlagern, Natursteinen in der Bauwerkserhaltung und dem Denkmalschutz. Dazu führt der Wissenschaftler seit über 20 Jahren Forschungsprojekte durch.*



*Dr. Joerg Ruedrich, Jahrgang 1969, studierte Geologie/Paläontologie an der Universität Göttingen und wurde im Rahmen eines Stipendiums der Deutschen Bundesstiftung Umwelt 2003 promoviert. Zurzeit forscht er an der Charakterisierung der Zerstörungsmechanismen poröser Festkörper durch Salzbelastung und Frostsprennung. Das Forschungsgebiet von Dr. Ruedrich umfasst die Verwitterungsprozesse von Naturwerksteinen und die Prognose ihres zeitlichen Verlaufs. Weiterhin arbeitet er an der Entwicklung von Verfahren zur Verbesserung der Langzeitstabilität umweltgeschädigter Bauwerke.*

Snehlage, R. »Stein: Zerfall und Konservierung«, Edition Leipzig.

Siegesmund, S., Middendorf, B., Maack, V. & Rüdlich, J. 2000: Das Marktortor von Milet – Schadensbilder, Materialcharakteristika und Entwicklung von Restauriermörtel. In: Siegesmund, S., Auras, M. & Snehlage, R. »Stein: Zerfall und Konservierung«, Edition Leipzig.

Siegesmund, S., Ullemeyer, K., Weiss, T. & Tschegg, E.K. 2000. Physical weathering of marbles caused by anisotropic thermal expansion. International Journal of Earth Science, 89: 170-182.

Strocka, V.M., 1981. »Das Marktortor von Milet«, 128. Winkelmannsprogramm der Archäologischen Gesellschaft zu Berlin, Verlag Walter de Gruyter & CO., Berlin.