

## **1. Allgemeine Angaben**

### **Fortsetzungsantrag auf Gewährung einer Sachbeihilfe im Rahmen eines Paketantrages**

**DFG-Schriftzeichen: BR 2147/1-1**

#### **1.1 Antragsteller**

1.1.1 Stefan Brüggerhoff, Dr. rer. nat., Dipl.-Chem.  
Stellv. Museumsdirektor; Leiter des Fachbereiches Denkmalschutz/Materialkunde  
geb. 14.02.1956, deutsch  
Deutsches Bergbau-Museum Bochum  
Fachbereich Denkmalschutz/Materialkunde  
Herner Straße 45  
44787 Bochum  
Tel.: 0234 / 968 - 4032  
Fax: 0234 / 968 - 4040  
e-mail: stefan.brueggerhoff@bergbaumuseum.de  
privat: Helenenstraße 85 c  
45475 Mülheim  
Tel.: 0208 / 75 36 32

#### **1.2 Thema**

Verhalten von Salzen in porösen Systemen - Untersuchung der Zusammenhänge von  
Porenraum, Salztyp und hygrischer Dilatation

#### **1.3 Kennwort**

Materialdilatation bei Salzeinwirkung

#### **1.4 Fachgebiet und Arbeitsrichtung**

Geowissenschaften, Materialwissenschaften, Salzverwitterung

#### **1.5 Voraussichtliche Gesamtdauer**

drei Jahre

bisherige Förderung: zwei Jahre

#### **1.6 Antragszeitraum**

12 Monate

#### **1.7 Gewünschter Beginn der Förderung**

Datum der bisherigen Bewilligung: 24.04.2001

Personalmittel reichen bis vor. 31.07.2003

Sachmittel reichen bis vor. 31.07.2003

## 1.8 Zusammenfassung

Die Wirkung von Salzen in porösen Materialien ist Gegenstand des hier beschriebenen, seit knapp zwei Jahren laufenden Forschungsvorhabens unter Beteiligung einer Projektgruppe aus vier Forschungseinrichtungen. Das Ziel besteht darin, den bis heute nicht zufrieden stellend beschriebenen Mechanismus der Salzverwitterung zu visualisieren und validieren. Dabei sind die Antragsteller durch ihre bisherigen Forschungsergebnisse bestärkt worden, dass Fortschritte nur durch systematische Untersuchungen zur Wirkung unterschiedlicher Salztypen bei variierenden Substraten mit sehr genau charakterisierten Materialparametern gewonnen werden können. Schwerpunkt der Arbeit des Antragstellers in der Forschungsgruppe ist die Erfassung der Salz bedingten Verformung von porösen Substraten mittels eines hoch auflösenden Dilatometeraufbaus und die Korrelation dieser Effekte mit den Substrateigenschaften sowie den Zustandsparametern der beeinflussenden Salze. In der ersten Projektphase hat sich der gewählte Versuchsaufbau bereits bewährt und neue Erkenntnisse im Hinblick auf die Dimension der Materialverformung durch die Salzkristallisation erbracht. Durch die *in situ*-Erfassung der Längenänderung einer Probe ist der Prozess der Kristallisation oder der Übergang in andere Hydratstufen sehr genau zu verfolgen. Neben der Aussage zur Materialverformung können den Partnern sehr genaue Angaben über die Zeitpunkte der Salz-Substrat-Wechselwirkung gegeben werden. Damit sind dann gezielte Probenahmen z.B. für eine Kryo-REM-Untersuchung des spezifischen Zustandes möglich, was wiederum eine Visualisierung der Salz-Substrat-Reaktion ermöglicht.

Die erzielten Ergebnisse stellen bisher aber nur einen punktuellen Ansatz in der deutlich breiter gedachten Untersuchungsmethodik dar. In der hier beantragten Fortsetzung soll daher neben einer Erweiterung in Bezug auf die Substratauswahl (systematische Variation von Porenstruktur und Festigkeitsparameter) eine ebensolche Variation auch bei den zu untersuchenden Salzen verwirklicht werden. Insbesondere wird die Möglichkeit zur Ausbildung von Hydratstufen bei den Salzen als Auswahlkriterium zu berücksichtigen sein. Um die recht komplexen Dilatometerergebnisse wirklich exakt erklären und verifizieren zu können, gilt es die Zustände innerhalb der Probekörper durch Randbedingungen während der Messung gezielt zu steuern (speziell durch die Variation der Luftfeuchte und Temperatur). Dies erlaubt eine realistische Bewertung des Materialverhaltens unter Salzeinfluss und damit die Verwirklichung der Zielvorstellung im Antrag.

Bei allen Untersuchungen auch in der Fortsetzungsphase wird weiterhin stark auf das Konzept des Paketantrages gesetzt, bei dem die Partner mit ihren Untersuchungen aufeinander aufbauen können.

## 2. Stand der Forschung, eigene Vorarbeiten

### 2.1 Stand der Forschung

Der relevante Forschungsstand wurde bereits im Antrag zum laufenden Vorhaben ausführlich dargestellt. Auf diese Ausführungen sei an dieser Stelle noch einmal verwiesen, und daher nur eine knappe Zusammenfassung präsentiert: Der Mechanismus der Salzverwitterung ist bis heute nicht zufrieden stellend visualisiert und validiert worden. Die Zusammenfassung bisher dazu diskutierter Modelle, von GOUDIE und VILES (1997) vorgelegt, zeigt den noch immer vorhandenen großen Diskussions- und Klärungsbedarf zum Thema Wirkungsmechanismen bei der Salzkristallisation und vor allem zum Aufbau eines „Druckes auf das Materialgefüge“.

Salze kristallisieren erst dann aus, wenn das Stabilitätsgebiet der jeweiligen Kristallphase erreicht worden ist (KLEBER 1956). Erst beim Überschreiten der Gleichgewichtskurve kann eine Keimbildung stattfinden, an die sich ein Kristallwachstum anschließt. Ist das Volumen der Flüssigkeit plus der Kristalle dann größer als das Volumen der gesättigten Flüssigkeit, wird ein Druck auf den umschließenden Porenraum ausgeübt (Kristallisationsdruck). Es können dabei Übersättigungen auftreten, ohne dass eine ausgeprägte Keimbildung einsetzt. Diese Übersättigungen stellen eine wichtige Voraussetzung für die Intensität des Wachstums der wenigen gebildeten Kristallen gegen eine äußere Begrenzung dar (linearer Wachstumsdruck). Die Keimbildung wird durch die spezifische Oberflächenenergie des Raumes beeinflusst, in dem die Kristallisation stattfinden soll (CORRENS (1939) hat zeigen können, dass bestimmte Kristalle zwischen Glas- aber nicht zwischen Glimmerplatten wachsen).

Ein weiterer Mechanismus wird im Übergang von wasserfreien Salzen in eine hydratisierte Stufe gesehen (Hydratationsdruck). Hierbei wird von einer erheblichen Volumenzunahme ausgegangen und eine entsprechender Krafteinwirkung auf das Wirtsgefüge postuliert.

Aufbauend auf den Arbeiten von EVERETT (1961) verwenden FITZNER und SNETHLAGE (1982) den Ansatz, dass die Kristallisation in großen Poren energetisch gegenüber der in kleinen Poren bevorzugt sein wird. Da Salzlösung aus angrenzenden kleineren Poren in große nachgeliefert wird, kann sich dort ein hinreichender Sprengdruck aufbauen. Hier wird allerdings eine Porenradienverteilung mit einer ausgeprägten zweigipfeligen Verteilung vorausgesetzt. Von PÜHRINGER (1983) wird das sogenannte „Salzfilm-Modell“ postuliert. Er geht von der Überlegung aus, dass sich in den Zwickelbereichen von Poren immer weitere Salzkristalle zu Aggregaten abscheiden bis die Zwickel ausgefüllt sind und diese dann leicht

aufgeweitet werden. Damit wird als Schadensursache eine oft wiederholte geringfügige Schubbeanspruchung der Materialoberflächen angenommen. In neuesten Arbeiten (PÜHRINGER (2002a,b)) erweitert er seine Ansätze dahin, dass der Schaden ganz wesentlich durch eine Volumenverringernng hervorgerufen wird, wenn die fein porösen Ablagerungen auf den Porenoberflächen wieder befeuchtet werden. Dieses löst s. E. die Schubspannungen in der Grenzfläche zwischen Salzablagerung und dem darunter liegenden Material aus.

Neben der Wirkung von Salzkristallen wird bei anderen Autoren der Einfluss von Salzlösungen bei der Betrachtung des Materialverhaltens berücksichtigt. Salzlösungen verursachen einen bestimmten Kapillardruck, der zu einer Ausdehnung des Gefüges führen kann. Dieser muss im Gesamtvorgang berücksichtigt, aber vom Wachstum der Salze abgegrenzt werden. In Untersuchungen von KLOSSE (1968) konnte aber andererseits nachgewiesen werden, dass die Anwesenheit von Elektrolyten in quellfähigen Natursteinen, z.B. Schieferton, einen negativen Einfluss auf deren Quellverhalten hat. Die Feuchtedehnung des Gesteins nimmt mit steigender Konzentration des Elektrolyten bis auf 30% des Quellwertes in reinem Wasser ab.

Trotz der vielfältigen theoretischen Diskussionen sind bisher nur wenige Studien mit einer direkten, systematischen Betrachtung der Materialdehnung durch die Salzkristallisation vorgelegt worden. WENDLER und RÜCKERT-THÜMLING (1993) beobachteten bei leicht löslichen Salzen im Naturstein eine hygrische Dilatation, die der bei Feuchtwechseln des unbelasteten Materials entgegen gesetzt ist (Schwinden bei hoher Feuchte, Quellen bei niedriger Feuchte) und eine ansteigende Restdehnung bei häufiger Wiederholung. Die Autoren benutzten das Salzfilm-Modell nach PÜHRINGER (1983) als Begründung für den Dehneffekt, da sie keine Porenradienverteilung mit großen und kleinen Poren beim Material bestimmen konnten. Die große Schwierigkeit in der Interpretationsmöglichkeit der vielen sonstigen Untersuchungsergebnisse im Themenbereich liegt vor allem darin begründet, dass die Arbeiten in ihren Randbedingungen (Geometrie der Probekörper, Chemismus der Materialien, Porencharakteristik und Salzkonzentrationen sowie Versuchsbedingungen) recht spezifisch, somit wenig vergleichbar und kaum allgemein aussagekräftig sind.

So kann letztlich festgestellt werden, dass die bisherigen Forschungen keinen allgemein akzeptierten Mechanismus erbracht haben, mit dem sich die beobachteten Verformungen von porösen Materialien bei der Kristallisation von Salzen verbindlich erklären oder gar bereits voraussagen ließen. Mit Hilfe der aufgeführten klassischen und neueren Theorien lassen sich bestimmte Schadensfälle deuten, ein Ausschluss von Mechanismen ist jedoch nicht endgültig möglich. Die Unsicherheit welche Vorgänge in Abhängigkeit vom porösen

Substrat, von der Zusammensetzung der beteiligten Salze und von den klimatischen Randbedingungen eine mehr oder weniger große Rolle spielen, stellen den Antrieb für die Durchführung der eigenen Untersuchungen in diesem Vorhaben dar.

## **2.2 Eigene Arbeiten / Arbeitsbericht**

Eine Darstellung der Vorarbeiten des Antragstellers ist im bewilligten Antrag zur laufenden Projektphase gegeben worden. Auf diese sei hier hingewiesen. Die inzwischen erzielten Ergebnisse im vorliegenden Forschungsvorhaben sind ausführlich in einem beigefügten Zwischenbericht (Anlage 9.4 zu diesem Antrag) niedergelegt, so dass auch hierzu nur eine kurze Zusammenfassung gegeben werden soll.

Eine einfache, wenn auch integrale Detektionsmöglichkeit für die Salzwirkung in einem porösen Medium ist durch die Beobachtung der Volumen- bzw. Längenänderung des Substrates gegeben. Diese kann mit einem hochauflösenden Dilatometer erfasst werden, was in den bisherigen Forschungsarbeiten des Antragstellers mit Natursteinmaterialien bereits ausgenutzt wurde (KIRCHNER und WORCH (1993), BLÖCHL et. al. (1998)). Da sich hierbei *in-situ*-Messungen durchführen lassen, können Effekte während des Eindringens der Salzlösung in das Substrat, beim Verdampfen des Lösungsmittels (Wasser) und bei der Aufnahme und Abgabe von Kristallwasser nachvollzogen werden. Eine systematische Untersuchung der Prozesse unter Variation definierter Randbedingungen (Chemismus und Porenstruktur des Materials, Salztyp und Feuchte-Temperatur-Bedingungen), um verallgemeinerbare Aussagen zu erreichen, fehlte aber zum Zeitpunkt der Erstantragstellung. Entsprechend gezielte Reihenuntersuchungen mit einem Dilatometer finden im laufenden Vorhaben statt und stellen die Basis für eine bei den Projektpartnern des Paketantrages weitergehende, aufwendigere Detailbetrachtung der Prozesse im Porenraum dar. Dabei wurde berücksichtigt, dass bei Substraten mit einem komplexen Aufbau, der Verformungseffekt durch die Salzkristallisation nur einer von verschiedenen Teileffekten ist. Eine isolierte Betrachtung dieses Effektes musste daher günstiger Weise mit „einfachen“ genau definierten Substraten beginnen. Gemäß dieser Zielsetzung wurden im vorliegenden Teilvorhaben bisher zwei Schwerpunkte verfolgt:

- Auswahl und Charakterisierung von geeigneten Substraten zur möglichst isolierten Erfassung der Wirkung der Salzkristallisation im Gefüge poröser Medien,
- Erfassung der integralen Wirkung der Salzkristallisation durch Aufzeichnung der Längenänderungen in den Substraten mittels eines Dilatometeraufbaus.

Die Suche nach geeigneten Substraten gestaltete sich schwierig, da die spezifischen Anforderungen an die Materialien, die sich aus den verschiedenen apparativen Bedürfnissen der Projektteilnehmer ergaben, zu beträchtlichen Einschränkungen in der Auswahl führte. Die Verfügbarkeit von entsprechend „einfach aufgebauten“ Substraten mit geringer hygrischer Eigendehnung aus dem Bereich der technischen Keramik wurde vor Projektbeginn zudem ein wenig überschätzt. Bei einphasigen Systemen mit spezifischer Porenradiengrößen (etwa 5  $\mu\text{m}$ ) sowie unter Berücksichtigung der Forderung nach gleich bleibender Qualität und Verfügbarkeit einer ausreichenden Liefermenge und -dimension für den Zuschnitt von Prüfkörpern für alle Projektteilnehmer konnten bisher vier Produkte aus dem Bereich der technischen Keramik gefunden und beschafft werden:

Korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), Cordierit ( $\text{Mg}_2\text{Al}_4\text{Si}_5\text{O}_{10}$ ), Alginat-Keramik (Metalloxidkeramik), Glasfritte (gesintertes  $\text{SiO}_2$ ).

Die Gefügecharakteristika der Materialien führte zu weiteren Einschränkungen, so dass letztlich die Materialien Korund und Glasfritte für die weiterführenden Untersuchungen herangezogen wurden. Durch einfache Laborbelastungsprüfungen (Salzsprengtest) konnte die Wirkung unterschiedlicher Salze bei den beiden Materialien beurteilt werden. Salze, die in unterschiedlichen Hydratmodifikationen kristallisieren können, bewirkten die dramatischsten Gefügeänderungen und damit Materialzerstörungen. Auf der Basis dieser Vorauswahltests wurden Natrium- und Magnesiumsulfat als Einwirkgrößen für die weiter gehenden Versuche festgelegt.

Der im Projekt gewählte Ansatz, für die Erfassung der Salz induzierten Dehnung Substrate mit möglichst geringer hygrischer Eigendehnung zu suchen und zu verwenden, wurde durch die bisher erzielten Ergebnisse voll bestätigt. Erst durch diese Substrate (Korund, Glasfritte) wurde die Größenordnung der unmittelbaren Gefügebeeinflussung durch die Salzkristallisation realistisch erfasst. Dabei zeigte sich, dass die Beträge der Dehnung recht gering sind (im Bereich weniger  $\mu\text{m}$  unter den gegebenen Versuchsbedingungen im Dilatometer) und deutlich unter den bisher vom Antragsteller und der Projektarbeitsgruppe aus den bisherigen Untersuchungen an Naturstein erwarteten Werten liegen. Durch die im Rahmen des Vorhabens erfolgte Verbesserung der Messapparatur sind die geringeren Werte trotzdem problemlos und gesichert zu erfassen. Der Einsatz eines Dilatometers hat sich dabei für die Verfolgung und Aufzeichnung der Wirkungen während der Kristallisation als sehr sinnvoll erwiesen. Problematisch im Hinblick auf die Umsetzung von Reihenuntersuchungen erweist sich allerdings die Tatsache, dass die einzelne Messung – verbunden mit der notwendigen Einstellung von Gleichgewichten - einen hohen Zeitanspruch hat. Messungen an einer Probe über einen oder gar mehrere Tage sind die Regel. Dieser Zeitbedarf führt zu einer eher tastend zielorientierten als breit streuenden Vorgehensweise.

Da Ausblühungen auf der Oberfläche unter bestimmten Kristallisationsbedingungen zum typischen Erscheinungsbild gehören, innerhalb des Gefüges dann aber nicht wirksam werden, war eine isolierte Erfassung der Materialdehnung - unabhängig von diesen Ausblühungen - ein wichtiger Punkt in der apparativen Gestaltung der Versuchsanordnung im Teilvorhaben. Die notwendige, ungestörte Erfassung geringer Dehnbeträge rückte dieses bisher untergeordnete, messtechnische Problem besonders in den Interessenfokus. Die beträchtlichen Schwierigkeiten bei der Probenfixierung im Dilatometer konnten bisher nur teilweise gelöst werden. Da bei der derzeit möglichen, direkten Einspannung der Probe in die Apparatur immer ein Ausblühen an den Auflagerpunkten unterdrückt werden muss, konnten bisher nur eingeschränkte Kristallisationsbedingungen untersucht werden (rasche Trocknung, so dass die Kristallisation ausschließlich innerhalb des Substrates erfolgte). Auch die gezielte Beeinflussung der Oberfläche zur Verhinderung der Kristallisation an dieser Fläche (Versiegelung) konnte noch keinen wirklich zufrieden stellenden Zustand bewirken und stellt letztlich auch wieder nur eine eingeschränkte Untersuchungsbedingung dar. Zwar wurden mit diesen ersten Lösungsansätzen schon sehr interessante grundsätzliche Ergebnisse erzielt, es gilt aber den apparativen Aufbau in Bezug auf die Probenhalterung noch zu verbessern.

Grundlegende Erkenntnisse zur Materialdilatation unter Salzeinfluss wurden im System Glasfritte / Magnesiumsulfat ermittelt. Um eine ausblühungsfreien Kristallisation (s. o.) einer in das Substrat eingebrachten Salzlösung zu erzielen, wurde mit einer erhöhten Trocknungstemperatur gearbeitet. Dies machte eine zusätzliche Berücksichtigung der thermischen Dehnung der Substrate notwendig. Der Verlauf der Materialdilatation bei der Trocknung ermöglichte jedoch eine sehr gute Visualisierung der Kristallisationsphasen sowie der Übergänge in andere Hydratstufen. Die ersten erfolgreichen Versuche erlauben nun die Abschätzung der Wirkung der Kristallisation im Gefüge und der der Dimension der hierdurch bedingten Volumenänderung. Damit steht außerdem ein Verfahren zur Verfügung mit dem die Partner im Paketantrag über die genauen Zeitpunkte von Materialveränderungen informiert und damit gezielte Probennahmen möglich gemacht werden können.

Der komplexe Verlauf der Dilatationskurven deutet darauf hin, dass unterschiedliche Phasen (Lösung und Kristalle in unterschiedlichen Hydratstufen) während der Trocknung in der Probe gleichzeitig vorliegen können. Der beträchtliche Wechsel von Dehnung und Schrumpfung bei den unterschiedlichen Stadien (gerade bei Salzen mit verschiedenen Hydratstufen) stellt eine hohe Belastung für das Substrat dar, was die Ermüdung des Materials und dessen Zerfall erklärt. Die bisherigen Untersuchungen lassen allerdings noch

keine Detailaussagen zu. Es gilt genau zu untersuchen, welche Zustände innerhalb der Probekörper während der Kristallisation vorliegen, um die recht komplexen Dilatometerergebnisse wirklich exakt erklären und verifizieren zu können. Existieren Lösung und unterschiedliche Hydratstufen zum gleichen Zeitpunkt an unterschiedlichen Stellen der Probe (Innen- und Außenbereiche) und kommt es zur Wechselwirkung, was die Dilatometeruntersuchungen andeuten? Hier bewährt sich das Konzept des Paketantrages, bei dem die sich ergänzenden Partner mit ihren Untersuchungen aufeinander aufbauen können. Bei den Partnern in Bremen und Hamburg sind entsprechende Detailuntersuchungen bereits angelaufen.

### **3. Ziele und Arbeitsprogramm**

#### **3.1 Ziele**

Das Gesamtziel dieses Teilprojektes wurde bereits im Erstantrag ausführlich formuliert. An dieser Stelle wird ausgehend von den bereits erreichten Teilergebnissen eine Darstellung der anzustrebenden Forschungsziele in der Restlaufzeit des Antrags und besonders in der darauf aufbauenden hier beantragten Fortsetzungsperiode vorgestellt. In Bezug auf die übergeordneten Zielsetzungen des Paketantrages sei auch auf die Zusammenfassung des Gesamtpaketantrags hingewiesen.

Im Mittelpunkt der weiteren Untersuchungen wird weiterhin die Aufklärung der „makroskopischen“, integralen Wirkungen von Kristallisationsprozessen verschiedener Salze in porösen Substraten mit unterschiedlichen Gefügeparametern stehen. Der Einsatz eines Dilatometers hat sich für die Verfolgung und Aufzeichnung der Wirkungen während der Kristallisation als sehr sinnvoll erwiesen. Durch die im Rahmen des Vorhabens erfolgte Verbesserung der Messapparatur sind auch geringe Salz bedingte Dehnwerte, die bisher bei Substraten mit geringer hygrischer Eigendehnung ermittelt wurden, gesichert zu erfassen.

Da Ausblühungen auch auf der Oberfläche unter bestimmten Kristallisationsbedingungen zum typischen Erscheinungsbild gehören, innerhalb des Gefüges dann aber nicht wirksam werden, ist eine isolierte Erfassung der Materialdehnung unabhängig von diesen Ausblühungen ein wichtiger Zielpunkt der apparativen Weiterentwicklung im Projekt. Da bisher bei direkter Einspannung der Probe in die Apparatur aus den o. g. Gründen immer ein Ausblühen an den Auflagerpunkten unterdrückt werden musste, konnten nur eingeschränkte Kristallisationsbedingungen untersucht werden. Auch die gezielte Beeinflussung der



Oberfläche zur Verhinderung der Kristallisation an dieser Fläche stellt letztlich eine eingeschränkte Untersuchungsbedingung dar. Zwar wurden mit diesen ersten Lösungsansätzen schon sehr interessante grundsätzliche Ergebnisse erzielt, es gilt aber den apparativen Aufbau in Bezug auf die Probenhalterung noch zu verbessern. Hier wird in der Restlaufzeit durch den Einsatz von Hilfskonstruktionen (spezielle Auflager) eine Optimierung angestrebt.

Der im Projekt gewählte Ansatz, für die Erfassung der Salz induzierten Dehnung Substrate mit möglichst geringer hygrischer Eigendehnung zu suchen und zu verwenden, wurde durch die bisherigen Ergebnisse voll bestätigt. Die Verfügbarkeit von entsprechend „einfach aufgebauten“ Substraten aus dem Bereich der technischen Keramik wurde vor Projektbeginn allerdings etwas überschätzt. Für die weiteren Versuche mit einer stärkeren Variation der Materialparameter wird daher parallel zu den laufenden Untersuchungen weiterhin nach geeigneten Substraten gesucht werden müssen. Variiert werden sollen vor allem die Parameter Porenradienstruktur und Festigkeit- bzw. Elastizität des Materials, um hiermit grundsätzlichere Aussagen treffen zu können. Im Fortsetzungsjahr muss eine Übertragung auf technische Materialien zumindest in ersten Ansätzen erfolgen.

Die bisher erzielten Ergebnisse speziell mit der Substrat-Salz-Kombination „Glassfritte / Magnesiumsulfat“ lassen bereits sehr interessante und wichtige Erkenntnisse zu. Sie stellen aber nur einen punktuellen Ansatz in der deutlich breiter gedachten Untersuchungsmethodik dar. Neben der oben bereits beschriebenen Erweiterung in Bezug auf die Materialauswahl (systematische Variation von Porenstruktur und Festigkeitsparameter) ist eine ebensolche Variation auch bei den zu untersuchenden Salzen anzustreben. Hier wird besonders die Möglichkeit zur Ausbildung von Hydratstufen als Auswahlkriterium zu berücksichtigen sein (Salze, die keine, wenige, viele mögliche Hydratstufen ausbilden). Wichtige Voraussetzung ist hier allerdings die erfolgreiche Verbesserung der Probenfixierung im Dilatometer (Erfassung der Dehnung ohne Einfluss von oberflächlichen Ausblühungen).

Um die recht komplexen Dilatometerergebnisse wirklich exakt erklären und verifizieren zu können, gilt es im Projekt zu klären, welche Zustände innerhalb der Probekörper während der Kristallisation vorliegen. Existieren Lösung und unterschiedliche Hydratstufen zum gleichen Zeitpunkt an unterschiedlichen Stellen der Probe (Innen- und Außenbereiche) und kommt es zu deren Wechselwirkung, was die bisherigen Dilatometeruntersuchungen andeuten. Hierzu sollen zum einen die Kristallisationsbedingungen weiter variiert werden. Durch unterschiedliche Trocknungsbedingungen aber auch Luftfeuchtewechsel bei der Dilatometermessung sollen die resultierenden Längenänderungen einen Aufschluss über

das Verhalten des Salzes im Material liefern. Darüber hinaus wird stark auf das Konzept des Paketantrages gesetzt, bei dem die Partner mit ihren Untersuchungen aufeinander aufbauen können. Die Ergebnisse der Dilatometermessungen geben den Partnern wichtige Informationen zu welchen Zeitpunkten in der Probe eine Veränderung stattfindet, so dass gezielte Probenahmen und Versuchsplanungen möglich sind. Andererseits liefern die dabei erzielten Untersuchungsergebnisse eine entscheidende Interpretationshilfe für die Dehnungskurven.

Ebenfalls noch nicht geklärt, ist die Frage der Teilbeiträge zur Längenänderung in einer Probe. Trägt die gesamte dünne Salzschrift in der erfassten Messachse (4 cm) zur Dehnung bei oder resultiert der Dehnbetrag überwiegend aus der Volumenänderung an den Auflageflächen. Wie groß sind die Beiträge der unterschiedlich gerichteten Flächen. Da mit den Dilatometeruntersuchungen nur der integrale Aspekt der der Dehnung erfasst werden kann, wird hier die Verformungsmessung in Oldenburg weiter gehende Rückschlüsse ermöglichen. Im Verlauf der eigenen Messungen soll allerdings versucht werden, durch eine Variation der Probenlänge (Frage: gleiche Wirkung oder proportionale Wirkung) zumindest grobe Informationen zum Dehnbeitrag der unterschiedlichen Flächen zu erhalten und zusätzlich über Messuhren eine mehrdimensionale Erfassung der Dehnung zu verwirklichen.

### **3.2 Arbeitsprogramm**

Eine Übersicht zu den geplanten Aktivitäten in der Restlaufzeit des bewilligten Vorhabens und dem hier beantragten Verlängerungsjahr ist in der Anlage 9.2 zu diesem Antrag als Balkenplan beigefügt. Diesem Balkenplan ist vor allem die zeitliche Abfolge der verschiedenen Untersuchungsschritte zu entnehmen, da das nachfolgende Arbeitsprogramm in Bezug auf den methodischen Ansatz gegliedert wurde.

#### **3.2.1 Apparative Veränderungen/Optimierungen der Dilatationsmessungen**

*Verbesserung des apparativen Aufbaus:*

Eine dringend notwendige Verbesserung des apparativen Aufbaus ist im Bereich der Probenfixierung im Dilatometer zu verwirklichen. Da Ausblühungen auf der Substratoberfläche beim Kristallisationsprozess einen üblichen Zustand darstellen, soll in der Restlaufzeit eine Halterung entwickelt werden, die in die Probe eingebunden (gesteckt /geschraubt) wird. Diese Auflage soll so ausgebildet werden, dass ein Metallhorn in die Probe eingebettet wird, auf dessen Verlängerung ein Teller sitzt. Hierdurch könnte ein Abstand des resultierenden Widerlagers zur bisherigen Substratoberfläche geschaffen

werden, so dass dort Ausblühungen auftreten können, ohne dass sie die Messungen der Substratverformung beeinflussen.

Daneben sind weitergehende Versuche zur Absperrung der Stirnflächen und dem hierdurch bedingten Verhindern von Ausblühungen angedacht (auch zur Verstärkung der Dehnung). Geplant sind Tests mit einem Verkleben der Stirnflächen u. a. mit Siegelwachs.

*Erweiterung des apparativen Aufbaus (Erfassung der Volumenänderung mittels Messuhren):*

Um eine wirkliche Bewertung der Substratverformung abgeben zu können, soll neben der eindimensionalen Längenmessung mittels Dilatometer auch ein mehrdimensionaler Messaufbau mittels Dehnungsmessuhren getestet und eingesetzt werden. Dies wird sich voraussichtlich nur an größeren Probendurchmessern verwirklichen lassen, so dass der Einsatz der bisher untersuchten keramischen Testsubstrate (auf Grund der geringen Lieferdimensionen) dabei problematisch werden könnte. Diese Substrate sollen daher eher durch eine Variation der Länge der Messachse im Hinblick auf die Volumenabhängigkeit der Verformungscharakteristik untersucht werden.

Untersuchungen mit dem Messuhrenaufbau sollen vorwiegend an realen Baustoffproben (speziell hergestellte Mörtelquader (siehe 3.2.3) bzw. Natursteinprismen) durchgeführt werden. Voraussetzung ist auch hier, dass das Problem der Ausblühungen durch eine der oben vorgestellten Methoden gelöst werden kann.

*Erweiterung des apparativen Aufbaus (Möglichkeit zur Variation der Feuchte im Luftstrom über der Probe):*

Um die Kristallisationsbedingungen bei der Dilatometermessung stärker variieren zu können, soll der Anbau einer gezielten Luftbefeuchtungseinrichtung an das Dilatometer verwirklicht werden. Damit soll der Luftstrom, der über die Probe geleitet wird, gezielt auf eine definierte Luftfeuchte eingestellt und diese – wenn möglich - auch variiert werden können. Durch diese Vorrichtung sollen Kristallisations- und Auflösungszyklen in einer Probe ohne zwischenzeitliche Probenmanipulation verwirklicht (siehe auch 3.2.4) und der Dehnungs- bzw. Schrumpfungsverlauf ungestört beobachtet werden.

### **3.2.2 Variation der Salztyps**

Magnesiumsulfat hat sich für die Untersuchungen als idealer Salztyp mit einer hohen Wirkung in Bezug auf die Materialverformung erwiesen. Auf Grund seiner unterschiedlichen Hydratstufen ist eine breite Variation der Versuchsbedingungen mit Kristallations- und Dehydratationsprozessen zu verwirklichen (siehe auch 3.2.4). Daher sollen weitere Untersuchungen an anderen Substraten auch mit diesem Salz erfolgen (siehe 3.2.3).

Um aber eine breitere Basis bei den Aussagen zum Verhalten unterschiedlicher Salztypen zu erhalten, sollen aber auch andere Salze exemplarisch eingesetzt werden. Auswahlkriterium wird vor allem die Bildung von Hydraten bei den unterschiedlichen Salzen sein. Als Salz mit wenigen Hydratstufen ist Natriumsulfat, als ein Salz ohne (einfach zu erreichende) Hydrate ist Natriumchlorid vorgesehen.

Abschließend ist auch die Kombination von Salzen angedacht. Hier sollen vor allem solche Kombinationen eingesetzt werden, die bei Zugabe des zweiten Salztyps zur plötzlichen Übersättigung des Basissalzes führen. Die damit verbundenen Prozesse werden speziell im Porenraum stattfinden und ermöglichen so eine rasche ungestörte Aufzeichnung der Materialverformung. Darüber hinaus sind hier keine zusätzlichen Dehnbeiträge wie z.B. durch eine Trocknung bei erhöhter Temperatur zu berücksichtigen. Im Hinblick auf die Auswahl solcher Salzkombinationen werden intensive Gespräche mit dem Projektpartner aus Hamburg geführt werden.

### **3.2.3 Variation des Substrates**

Der Substrataufbau stellt eine weitere wichtige Größe in der Bewertung der Salzwirkung dar. Als Hauptkriterien für eine Variation des Substrates werden in der Fortsetzungsphase die Porencharakteristik und die Festigkeit des Materials herangezogen. Da die erste Projektphase gezeigt hat, dass nur eine eingeschränkte Verfügbarkeit von „einfach aufgebauten“ Substraten mit geringer hygrischer Eigendehnung gegeben ist, muss versucht werden, in diesem Angebot jetzt gezielt Materialien mit unterschiedlicher Materialcharakteristik (in Bezug auf die Parameter Porenraum und Festigkeit) zu finden. Dabei wird der Aspekt der Nutzbarkeit auch für andere Projektgruppen diesmal zwar berücksichtigt, aber nicht als Ausschlusskriterium verwendet werden.

#### *Variation des Porenradius bei „einfach aufgebauten“ Materialien (technische Keramik)*

Als Substrat hat sich in den bisherigen Untersuchungen vor allem das Material Glasfritte (Fa. Schott, Duran, Porositätsklasse 4) als günstig erwiesen. Hier wurden die geringsten Ausblühungen festgestellt. Zudem war das Material in gleich bleibender Qualität und größerer Menge verfügbar. Durch den Kontakt mit dem Hersteller ist in Aussicht gestellt worden, detaillierte Materialkennwerte speziell zur Festigkeit geliefert zu bekommen. In Erweiterung der bisherigen Arbeiten mit der Glasfritte Porositätsklasse 4 soll im Verlängerungszeitraum Glassintermaterial mit anderen Porenradien zum Einsatz kommen (verfügbar: Porositätsklassen 1 bis 5, entspricht Porendurchmessern etwa zwischen 1 und 100  $\mu\text{m}$ ). Bei gleich bleibendem Materialaufbau soll damit der Einfluss des Porendurchmessers bei der Salz induzierten Materialverformung ermittelt werden. Da entsprechende Materialien bereits beim

Projektpartner in Hamburg bei den Untersuchungen zur Porenraumabhängigkeit im Kristallisationsverhalten eingesetzt werden, ist eine hohe Korrelationsdichte der Ergebnisse zu erwarten.

#### *Variation der Festigkeits- und Elastizitätsparameter*

Um neben der Beziehung der Salz induzierten Längenänderung zur Porenraumcharakteristik auch eine Abhängigkeit von der Festigkeit eines Materials (Druckfestigkeit, Elastizität) bestimmen zu können, soll zusätzlich zu den Versuchen mit der Glasfritte mindestens ein Material mit vergleichbarer Porengröße aber deutlich abweichenden Festigkeitswerten bei den Dilatometermessungen eingesetzt werden. Wichtige Voraussetzung ist hier die Kenntnis der Festigkeitsdaten. Da bisher nur kleine Proben lieferbar waren und diese relativ schwierig in Bezug auf die Festigkeit zu analysieren sind, soll noch einmal Kontakt mit den Herstellern aufgenommen werden, um das insgesamt verfügbare Datenmaterial abzufragen. Als erster Kandidat ist der bereits eingesetzte Korund angedacht. Darüber hinaus sind auch Versuche mit vorgeschädigtem Material (erzielt außerhalb des Dilatometers) vorgesehen, um Stufen in der Entwicklung des Verformungsverhaltens im Schadensprozess verfolgen zu können.

#### *Einsatz von realen Baustoffproben*

Wie bereits im Erstantrag formuliert, sollen zum Projektende hin reale Baustoffproben in die Untersuchungen eingebunden werden. Damit sollen auch mineralogisch komplexe Systeme mit einbezogen werden. Hierzu gehören sowohl Natursteine wie auch künstlich hergestellte Baustoffe mit mineralischer, organischer oder kombinierter Bindung. Der Vorteil der künstlichen Systeme besteht darin, dass sich eine Zahl von Gefügeparametern gezielt einstellen lässt. So kann bei geeigneter Wahl von Bindemitteln, Zuschlägen und Zusätzen die Ausbildung des Porenraumes und des Gefüges beeinflusst werden. Ein wichtiges Auswahlkriterium zu Beginn wird die Höhe der reinen hygrischen Dehnung sein. Ist der Betrag hier dominant gegenüber der zu erwartenden Dehnung durch die Salzkristallisation, ist das Material eher weniger geeignet. Favorisiert ist derzeit ein Material aus Kalk gebundenen Marmorgrus.

Da Natursteine wesentlich diffiziler aufgebaut sind, ist auch hier ein erhöhter Voruntersuchungsaufwand notwendig. Wie bereits im Erstantrag dargestellt, reagieren einige Komponenten (Schichtsilikate) der Natursteine mit Wasser und zeigen deutliche Quellerscheinungen, die die Beobachtung der Wechselwirkung mit den Salzen erschweren oder überlagern. Weiterhin können einige Minerale strukturell mit den Salzlösungen reagieren, indem sie Kationen aus den Salzlösungen in Zwischenschichten einbauen und somit ihre Gitterparameter nachhaltig verändern. Diese Reaktionen müssen bei den Untersuchungen erfasst und berücksichtigt werden. Um hier eine gewisse Bandbreite der Einflüsse erfassen

zu können, soll zum einen ein relativ einfach aufgebautes Material (Obernkirchener Sandstein) und andererseits ein komplexes Sedimentgestein mit hohen Tonanteilen (Sander Schilfsandstein) zum Einsatz kommen. An diesen Materialien sollen zuerst Dilatometeruntersuchungen (Verfahrensparameter durch die Voruntersuchungen an den Testsubstraten aus dem Bereich der technischen Keramik bestimmt) mit kleinen Proben und danach auch Untersuchungen mit Hilfe des Messuhrensystems an größeren Körpern durchgeführt werden (siehe 3.2.1).

### **3.2.4 Variation der Kristallisationsbedingungen**

Die bisherigen Dilatometeruntersuchungen waren von der Schwierigkeit geprägt, Ausblühungen auf dem Substrat zu vermeiden, um die Erfassung der Salz bedingten Materialdehnung nicht durch diese Ausblühungen zu verfälschen. Aus diesem Grund wurden schnelle Trocknungsphasen gewählt, um die Kristallisation in die Oberfläche zu verlegen. Wenn das Problem der Probenfixierung gelöst ist (siehe 3.2.1), soll die Variation der Trocknungsbedingungen deutlich erweitert werden. Untersucht werden soll die Kristallisation aus der Lösung ohne plötzliche Übersättigung unter verschiedenen Trocknungsbedingungen (langsam, schnell, stufenweise). Ein weiterer wichtiger Variationspunkt wird auch die Salzkonzentration der aufgegebenen Lösung (vorerst vor allem Erhöhung) sein. Der Einsatz von vorgeschädigtem Material (Belastung außerhalb des Dilatometers durch thermische Behandlung oder wiederholte Salzsprengtests) ist wie bereits erwähnt ebenfalls vorgesehen.

Erste positive Ergebnisse wurden bisher auch mit der Aufzeichnung des Verformungsverhaltens bei der durch plötzliche Übersättigung hervorgerufenen Kristallisation von Salzen erzielt. Auch dieser methodische Ansatz soll daher weiterverfolgt werden, vor allem um Reaktionen von Salzen mit unterschiedlichen Hydratstufen (die eine unterschiedliche Löslichkeit haben) zu betrachten. Das Beispiel Magnesiumsulfat zeigte, dass hierbei durch das Erzeugen von übersättigten Lösungen dramatische Verformung auftreten können. Neben dem Einsatz von Einzelsalzen sollen auch Kombinationen zum Erreichen der Übersättigung herangezogen werden.

Ein entscheidender Ansatz für die Beurteilung der Auswirkung realer Kristallisations- und Lösungszustände wird die Verwirklichung einer gezielten FeuchteEinstellung für den Luftstrom über der Probe im Dilatometer sein. Durch Variation von Feuchte und Temperatur (Ofen) können mehrere Kristallisations- und Lösungszyklen im Hinblick auf die Materialverformung ohne eine zwischenzeitliche Probenmanipulation erfasst werden. Dies erlaubt eine realistische Bewertung des Materialverhaltens unter Salzeinfluss und damit die Verwirklichung der Zielvorstellung im Antrag.

## 4. Beantragte Mittel

Ein für das beantragte Fortsetzungsjahr aufgeschlüsselter Kostenplan liegt dem Antrag als Anlage 9.3 bei. Die folgenden Angaben stellen eine Zusammenfassung daraus dar.

### 4.1 Personalbedarf

Für das Deutsche Bergbau-Museum ist im Rahmen des Verlängerungsjahres die Beschäftigung einer studentischen Hilfskraft (ohne fertigen Hochschulabschluss) mit einer monatlichen Stundenzahl von 80 h vorgesehen.

**Aufgaben:** Unterstützung bei der Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Meßreihen mit dem Dilatometer.

### 4.2 Wissenschaftliche Geräte

entfällt, da auf vorhandene Ausstattung zurückgegriffen werden kann.

### 4.3 Verbrauchsmaterial

- Chemikalien (Salze, etc.), Verbrauchsstoffe und evtl. geringe Mengen Substratmaterial	250,-- €
- Material zur Optimierung des Messaufbaus	200,-- €
- EDV- und sonstiges Verbrauchsmaterial, Fachliteratur, Lit.-Recherchen	150,-- €
<b>Summe 4.3</b>	<b>600,-- €</b>

### 4.4 Reisen

Vierteljährige Projektbesprechungen, Beratungen und Ergebnisaustausch mit Projektpartnern (Bremen, Oldenburg, Hamburg)	300,-- €
Besuch einer internationale Tagung zur Darstellung der Ergebnisse	1.250,-- €
<b>Summe 4.4</b>	<b>1.550,-- €</b>

## **5. Voraussetzungen für die Durchführung des Vorhabens**

### **5.1 Zusammensetzung der eingebundenen Arbeitsgruppe**

Dr. Dipl.-Chem. Stefan Brüggerhoff (Projektleiter, eigenfinanziert)

Dipl.-Min. Dirk Kirchner (eigenfinanziert)

Dipl.-Ing. Jutta Zallmanzig (eigenfinanziert)

Georg Wange, Technischer Assistent (eigenfinanziert)

Marion Jung, Technischer Assistent (eigenfinanziert)

Martina Behmenburg, Technische Assistentin (eigenfinanziert)

Elisabeth Muschiol, Technische Assistentin (eigenfinanziert)

### **5.2 Zusammenarbeit mit anderen Wissenschaftlern**

entfällt (selbstverständlich außer mit den Mitgliedern der Arbeitsgruppen des Paketantrags)

### **5.3 Auslandsbezug**

entfällt

### **5.4 Apparative Ausstattung**

Im DBM steht für die Untersuchungen jetzt folgende Ausstattung zur Verfügung:

- Dilatometer DIL 801 der Fa. Bähr mit optimierter Auflösung
- Röntgendiffraktometer Siemens D500,
- Polarisationsmikroskope Axiophot der Fa. Zeiss mit angeschlossener Bildauswertung analySIS auto der Fa. SIS,
- Quecksilberhochdruckporosimeter autopore IV der Fa. Micromeritics ,
- BET-Analysator der Fa. Carlo Erba,
- Präparationseinrichtungen für die Probenherstellung.

### **5.5 Laufende Mittel für Sachausgaben**

Es werden erforderliche Anteile der Haushaltsmittel des in die Abwicklung des Vorhabens einbezogenen DBM-Fachbereichs zur Verfügung gestellt. Aus dem Haushalt des Deutschen Bergbau-Museums stehen dem Fachbereich pro Jahr insgesamt etwa ca. 40.000,-- Euro zur Verfügung.



## **6. Wirtschaftliche Verwertung**

entfällt

## **7. Erklärungen**

Ein Antrag auf Finanzierung dieses Vorhabens wurde bisher bei keiner anderen Stelle eingereicht. Wenn ich einen solchen Antrag stelle, werde ich die Deutsche Forschungsgemeinschaft unverzüglich benachrichtigen.

## **8. Unterschriften**

Bochum, den 05.05.2003

(Dr. Stefan Brüggerhoff)

## **9. Verzeichnis der Anlagen**

- Anlage 9.1: Literaturverzeichnis zum Fortsetzungsantrag
- Anlage 9.2: Balkenplan (zeitliche Planungen zum Fortsetzungsantrag)
- Anlage 9.3: Kostenplan
- Anlage 9.4: Zwischenbericht zum Erstantrag des DBM
- Anlage 9.5: Publikationsverzeichnis der Antragsteller (Zeitraum: 1998 – 2003)

## Anlage 9.1

### Literaturverzeichnis zum Fortsetzungsantrag

BLÖCHL, B., KIRCHNER, D. und STADLBAUER, E. (1998):

Die hygri sche Dehnung von **Baumberger** Kalksandstein - tonmineralogische und gesteinsphysikalische Aspekte.

in: Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlusses Clemenswerth/Emsland, Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen **15**, 46-53.

CORRENS, C.W. und STEINBORN, W. (1939):

Experimente zur Messung und Erklärung der sogenannten Kristallisationskraft.

Zeitschrift für Kristallographie, **101**, 117-133.

EVERETT, D.H. (1961):

The Thermodynamics of Frost Damage to Porous Solids.

Trans. Faraday Soc., **57**, 1541-1551.

FITZNER, B. und SNETHLAGE, R. (1982):

Einfluss der Porenradienverteilung auf das Verwitterungsverhalten ausgewählter Sandsteine.

Bautenschutz und Bausanierung, **5**, 97-103.

GOUDIE A. and VILES H. (1997):

Salt Weathering Hazards.

John Wiley & Sons, Chichester.

KIRCHNER, D. und WORCH, A. (1993):

Physikalische Vorgänge bei der Salzkristallisation.

Bautenschutz und Bausanierung, **7**, 101-103.

KLEBER, W. (1956):

Einführung in die Kristallographie.

VEB Verlag Technik, Berlin.

KLOSSE, D. (1968):

Beitrag zu Untersuchungen über das Quellverhalten tonmineralführender Nebengesteine des Ruhrkarbons.

Inaugural-Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

PÜHRINGER J. (1983):

Salt disintegration, salt migration and degradation by salt – a hypothesis.

Swedish Council for Building Research, **D15:1983**, Stockholm.

PÜHRINGER J. (2002a):

Hygrothermic Deterioration of Materials by Salts – a Technical Approach.

Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, **4(2002)**, 349-370.

PÜHRINGER J. (2002b):

Deterioration of Materials by Salt Precipitation: Techn. Aspects of Crystallisation/Hydration.

Internationale Zeitschrift für Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, **5(2002)**, 513-536.

WENDLER, E. und RÜCKERT-THÜMLING, R. (1993):

Gefügezerstörendes Verformungsverhalten bei salzbefrachteten Sandsteinen unter hygri scher Wechselbelastung.

Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Coll. on Materials Science and Restoration, Ed. WITTMAN, F. H., Esslingen, 1818-1830.

## Anlage 9.2

### Balkenplan (Zeitliche Planungen zum Fortsetzungsantrag)

	3. Jahr (Fortsetzungsjahr)
Apparative Optimierungen zur Erfassung der Längenänderung ohne Einflüsse durch Ausblühungen auf der Oberfläche	
Beschaffung von „einfachen“ porösen Substraten (Glasfritten, Oxid-Keramik, silikatische Keramik) inkl. Charakterisierung der Materialien im Hinblick auf Gefüge (Porenraum, Porenform) und Festigkeit	
Beschaffung / Herstellung von komplexen Substraten (künstl. Baustoffe, Naturstein)	
Dilatometermessungen mit den „einfachen“ Substraten: Variation der Kristallisationsbedingungen	
Dilatometermessungen mit den „einfachen“ Substraten: Variation der Salzeinflüsse	
Bestimmung des Verhaltens komplexer Substrate bei Einwirkung von Salzlösungen (Befeuchtungs- und Trocknungszyklen)	
Mehrdimensionale Erfassung der Längenänderung u.a. durch Einsatz von Messuhren	
Kontinuierliche Information an die Projektpartner und Bereitstellung von Testmaterial	
Entwicklung von Modellvorstellungen zum Kristallisationsprozess und zu den Phasenübergängen in Zusammenwirken mit den anderen Projektpartnern	
Erstellung des Endberichtes auf der Basis der erzielten Ergebnisse	

## Anlage 9.3

### Kostenplan für das Fortsetzungsjahr

Kostenarten	3. Jahr (Fortsetzungsantrag)
<b>Personal</b>	
Student. Hilfskraft: 19 Wochenst.	360 h
<b>Verbrauchsmaterial</b>	
Chemikalien + Testsubstrate	250,-- €
Verbrauchsstoffe f. d. Versuchs- und Probenpräparation	200,-- €
EDV- und sonstiges Verbrauchsmaterial, Fachliteratur, Lit.-Recherchen	150,-- €
<i>Summe</i>	<b>600,-- €</b>
<b>Reisen</b>	
Kontakte, Besprechungen, Messungen bei Partnern (alle Vierteljahre)	
Bremen	85,-- €
Oldenburg	85,-- €
Hamburg	130,-- €
Besuch eines Kongresses (Stone 2004)	1250,-- €
<i>Summe</i>	<b>1550,-- €</b>
<b>Gesamtsumme (ohne Personal)</b>	<b>2150,-- €</b>

## Anlage 9.5

### Publikationsverzeichnis der Antragsteller (Zeitraum 1998 – 2003)

1. BRÜGGERHOFF, S., BRUCHERTSEIFER, CHR. (1998):  
Die Konservierung von bruchfrischem Baumberger Kalksandstein im Laborversuch.  
in: Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlusses Clemenswerth/Emsland,  
Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen **15**, 54-61
2. BRÜGGERHOFF, S., MIRWALD, P.W. (1998):  
Baumberger Kalksandstein als Schadstoffsammler.  
in: Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlusses Clemenswerth/  
Emsland, Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen **15**, 62-68
3. BLÖCHL, B., KIRCHNER, D., STADLBAUER, E. (1998):  
Die hygri sche Dehnung von Baumberger Kalksandstein - tonmineralogische und  
gesteinsphysikalische Aspekte.  
in: Die Steinskulpturen am Zentralbau des Jagdschlusses Clemenswerth/  
Emsland, Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen **15**, 46-53
4. BRUCHERTSEIFER, CHR., BRÜGGERHOFF, S., STOPPEK\_LANGNER, K., GROBE,  
J., JURSCH, M., GÖTZE, H-J. (1998):  
Organosilicon Compounds for Stone Impregnation - Long-Term Effectivity and  
Weathering Stability.  
Organosilicon Chemistry III, Ed.: Auner, N., Weis, J.; Wiley-VCH, Weinheim, 531-537
5. BRÜGGERHOFF, S. (1998):  
Transparenter Korrosionsschutz für Industriedenkmäler aus Eisen und Stahl  
Industriekultur **2/98**, 16-17
6. SCHAD, J., BRÜGGERHOFF, S., KETTELHACK, Chr. (1998):  
Die Renaissance-Fassade des Lübecker Rathauses - Untersuchungen und  
Testmaßnahmen zur Erhaltung des Naturstein-Inventars  
Sonderdruck aus Denkmalpflege und Naturwissenschaft, Natursteinkonservierung II,  
Fraunhofer IRB Verlag, 229-269
7. KURSAWE, P., ZINN, P., BRÜGGERHOFF, S., LAIDIG, G. (1999):  
Multivariate Ansätze zur Auswertung einer Freilandexpositionsstudie mit  
Natursteinmaterial.  
Gefahrstoffe – Reinhaltung der Luft **59 (4)**, 135-141
8. BRÜGGERHOFF, S., KURSAWE, P., ZINN, P., LAIDIG, G. (1999):  
Effects monitoring with stone sensors. Results of exposure studies with Baumberg  
Calcareous Sandstone in Germany.  
in: „Quantification of Effects of Air Pollutants on Materials“, Proceedings of the UN/ECE  
Workshop, May 1998, Umweltbundesamt, Berlin, Texte 24/99, 113-127
9. BRÜGGERHOFF, S., CHEBA, S., LEISEN, H., WARSCHEID, TH. (1999):  
Carbonate crusts on marble fragments at the excavation site in Milet, Turkey:  
Examination of crust formation and first results of a cleaning concept.  
in: Proceedings of the 12th Triennial ICOM-CC Meeting, 29 August – 3 September,  
Lyon, VOL. II, 731-736

10. BRÜGGERHOFF, S., CHEBA, S., LEISEN, H., WARSCHEID, TH. (1999):  
Untersuchungen zur Krustenbildung auf Marmoroberflächen in Milet.  
in: Archäologischer Anzeiger 1999, Walter de Gruyter, Berlin, New York, 99-108
11. BRÜGGERHOFF, S. (1999):  
Ziele und Nutzen einer naturwissenschaftlichen Begleitung bei der Erhaltung von  
Objekten aus Naturstein – Erfahrungen aus dem BMBF-Denkmalenschutz-  
Forschungsprogramm.  
in: Werkstoffwissenschaften und Bauinstandsetzen V (MSR V), Vol. 1, AEDIFICATIO  
Publishers, Freiburg, 369-377
12. LAURENT, J.P., BRÜGGERHOFF, S., BASTIAN, G., BRUNJAIL, C., CHÉNÈ, G.,  
LEGRAND, J., MALAURANT, P., MORAT, P., VOUVÉ, J., WANGE, G. (2000):  
Etude de l'effet des sollicitations microclimatiques sur le cycle de l'eau dans la pierre.  
Zusammenfassende Beiträge des Abschlußkolloquium des Deutsch-Französischen  
Forschungsprogramms für die Erhaltung von Baudenkmalern, am 24.-25.2.1997 in  
Straßburg/F; exé productions, Paris, 178-195
13. OCHWAT, C., BRÜGGERHOFF, S. (2000):  
Instandsetzung der Renaissance-Fassade des Lübecker Rathauses.  
in: „Farbe in der Steinrestaurierung - Fassung und Schutz“, Andreas Boué (Hrsg.),  
Beiträge des 2. Workshops des Instituts für Bauchemie Leipzig e.V., Kloster  
Nimbschen 11. und 12. Juni 1999; Frauenhofer IRB Verlag, Stuttgart, 139-146
14. BRÜGGERHOFF, S., WANGE, G., MORAT, P., LeMOUËL, J-L., PERRIER, F. (2001):  
First results of using combined mass and temperature measurements to study the  
water flow at the rock-atmosphere interface.  
Journal of Cultural Heritage **Vol. 2 (No. 2)**, 117–132
15. KIRCHNER, D. (2001):  
Schadgasdepositionsmessungen  
in: Thiersch, K. und Kraus, K. (Hrsg.): Modellhafte Untersuchung zur Auswirkung von  
Schadstoffen auf Mörtel sowie beispielhafter Einsatz von Hinterspritz- und  
Putzergänzungsmörteln am Kloster Heydau, Institut für Steinkonservierung e.V,  
Bericht Nr. 13, Mainz, 7-15
16. KRAUSE, H.M., GARUS, G., KÖLLNER, B., BRÜGGERHOFF, S. (2002):  
Untersuchung zur Wirkung von Luftverunreinigungen auf Materialien an sechs  
Standorten mit unterschiedlicher Immissionsbelastung.  
Immissionsschutz **3 (2002)**, 80-86
17. BRÜGGERHOFF, S., FENDEL, H., FENDEL, V., HABER, G. J., HEIMLER, M.,  
KÖNIGFELD, P. (2002):  
Die Chorgitter des Osnabrücker Doms – Metallkonservierung und Restaurierung der  
Farbfassung unter Berücksichtigung von Untersuchungen zum Aspekt des  
Korrosionsschutzes.  
in: Königfeld, P. und Brüggerhoff, S. (Bearb.): Farbige Eisengitter der Barockzeit –  
Beiträge zu Geschichte und Funktion, Korrosion und Konservierung. Schriftenreihe des  
Niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege, Heft 27, CW Niemeyer  
Buchverlage, Hameln, 56-68

18. BRÜGGERHOFF, S. (2002):  
Zur Problematik der atmosphärischen Korrosion von Eisenwerkstoffen und möglichen Schutzmaßnahmen.  
in: Königfeld, P. und Brüggerhoff, S. (Bearb.): Farbige Eisengitter der Barockzeit – Beiträge zu Geschichte und Funktion, Korrosion und Konservierung. Schriftenreihe des Niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege, Heft 27, CW Niemeyer Buchverlage, Hameln, 70-75
19. ONDRASINA, J., KIRCHNER, D., SIEGESMUND, S. (2002):  
Freeze-thaw cycles and their influence on marble deterioration: a long-term experiment  
in: Siegesmund, S., Weiss, T. & Vollbrecht, A. 2002. Natural Stone, Weathering Phenomena, Conservation Strategies and Case Studies.  
Geological Society, London, Special Publications, **205**, 9-18
20. SIEGESMUND, S., KIRCHNER, D. (2003):  
Frost-Tau-Verhalten von Marmor - Langzeitexperimente zur Praxisnähe üblicher Prüfverfahren.  
Naturstein **2 (2003)**, 52-56