

# Probekapitel

*Mauerwerk-Kalender 2011*

*Nachhaltige Bauprodukte und Konstruktionen*

Herausgeber: Wolfram Jäger

Copyright © 2011 Ernst & Sohn, Berlin

ISBN: 978-3-433-02956-5

2011

## MAUERWERK KALENDER



Nachhaltige Bauprodukte  
und Konstruktionen

 **Ernst & Sohn**  
A Wiley Company

Wilhelm Ernst & Sohn  
Verlag für Architektur und  
technische Wissenschaften  
GmbH & Co. KG  
Rotherstraße 21, 10245 Berlin  
Deutschland  
[www.ernst-und-sohn.de](http://www.ernst-und-sohn.de)

 **Ernst & Sohn**  
A Wiley Company

# I Die Sicherung von historischen Gewölben am Beispiel der Kirche St. Michael in Elsdorf-Berrendorf

Axel Dominik und Sabine Koch, Bornheim-Merten

## 1 Einführung

In der Kirche St. Michael in Elsdorf-Berrendorf (Bild 1) sind sowohl Mauerziegelgewölbe (Kreuzrippengewölbe) aus dem 16. Jahrhundert als auch „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ aus der Jahrhundertwende des 19./20. Jahrhunderts vorhanden. Die Mauerziegelgewölbe waren vor der Instandsetzung hoch mit baustoffschädlichen Salzen belastet und in ihrer Tragfähigkeit so weit beeinträchtigt, dass der Abriss dieser einzigartigen Gewölbe im Betracht gezogen worden ist.

Vergleichende Festigkeitsuntersuchungen von beanspruchten und weniger beanspruchten Bereichen ergaben für die „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ eine deutlich verminderte Druckfestigkeit im Vergleich zur Erbauerzeit. Auch diese Gewölbe waren in ihrer Tragfähigkeit gefährdet.

An der Kirche wurden nach entsprechenden Voruntersuchungen, Eignungsversuchen und Forschungs- und Entwicklungsarbeiten, u. a. zusammen mit verschiedenen Forschungsinstituten, Produktherstellern und in der restauratorischen Instandsetzung erfahrenen Firmen, diese einzigartigen Gewölbe instand gesetzt.

Nachdem die Eignung der Maßnahmen nachgewiesen worden war, wurden nach einer entsprechenden Ausschreibung die Instandsetzungsarbeiten von einer in der restauratorisch konstruktiven Instandsetzung sehr erfahrenen Firma durchgeführt. Dazu zählten u. a. tragfähigkeitsverbessernde Maßnahmen wie:

- Tränkung der Gewölbemauerwerke mit speziellen Stoffen und Verfahren,



Bild 1. Kirchenansicht

- Auftrag von Gewölbe-Stütz-Putzsystemen zur Stabilisierung des Gewölbemauerwerks und zur möglichst langandauernden schadlosen Einlagerung von baustoffschädlichen Salzen,
- Anordnung von in ihren Eigenschaften an das Gewölbemauerwerk angepassten Oberlastrippen aus Gewölbe-Trag-Mörtel,
- Einbau von Zugankern zwischen den Gewölbeanfängern zur Aufnahme von Gewölbeschüben,
- Anordnung einer speziellen klimaregulierenden Wärmedämmebene oberhalb der Gewölbe zur Vergleichmäßigung der klimatischen Verhältnisse ober- und unterhalb des Gewölbemauerwerks und
- Einbau von neu entwickelten Spannkraftreglern [1, 2], um die Spannkraft in den Zugankern konstant zu halten.

Während und noch eine Zeitlang nach Abschluss der Instandsetzungsarbeiten wurden Klimamessungen und Messungen zur Änderung der Spannungszustände in den Zugankern vorgenommen.

Die gesamte Maßnahme wurde fachtechnisch betreut und immer in Absprache mit den an der restauratorischen Instandsetzung unmittelbar Beteiligten durchgeführt.

## 2 Bau- und Restaurierungsgeschichte

Die Entstehung der Kirche geht offensichtlich auf eine Kapelle zurück, die bereits im „liber valoris“ erwähnt wird und vermutlich schon dem Erzengel Michael geweiht war [3]. An diese Kapelle wurde im Jahre 1467 der noch heute vorhandene Westturm angebaut. Im Jahre 1524 wurde das damalige Kirchenschiff abgerissen [3]. Ebenfalls um 1524 begann ein Kirchenum- bzw. -neubau im spätgotischen Stil als Hallenkirche [4] (Bild 2). Aus dieser Zeit stammen offenbar auch die heute noch erhaltenen Gewölbefelder aus Mauerziegel-mauerwerk der westlichen drei Joche von Haupt- und nördlichem sowie südlichem Seitenschiff. Das Mauerwerk dieser Kreuzrippengewölbe besteht zwischen den Natursteinrippen aus Mauerziegeln und einem kalkreichen Mörtel. Auf den Gewölberücken (Gewölbeoberseite) ist vor mehreren Jahren ein Wärmedämmmörtel aufgetragen worden.

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde die Kirche erweitert. Diese Erweiterung ist mit den damals oft verwendeten „Kalk-Bimssteinen“ überwölbt worden.

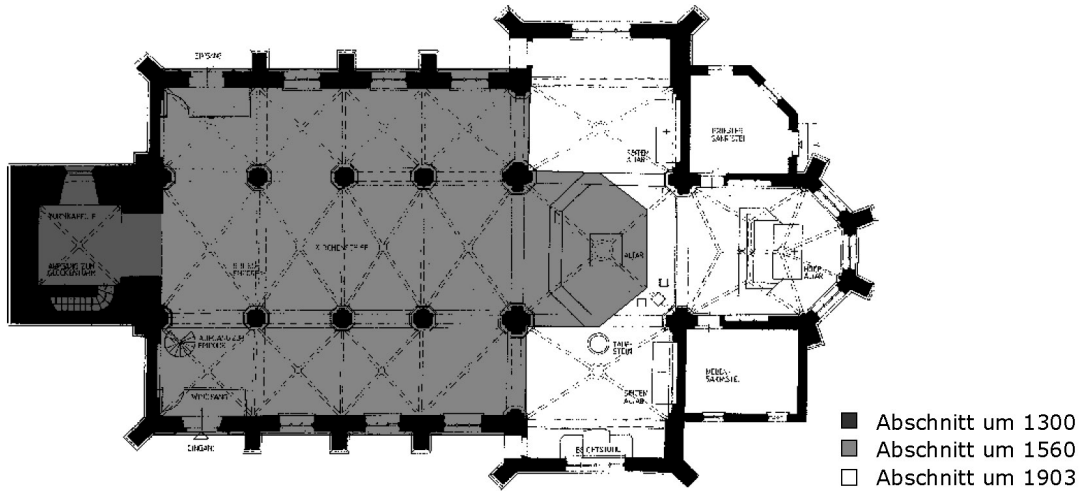


Bild 2. Grobübersicht zur Baugeschichte

Im Zuge der Instandsetzung wurden weitere, für die Kirchengeschichte bedeutsame Bauspuren festgestellt, die von den Planern sowie den Mitarbeitern der Restaurierungsfirma – ebenso wie die Restaurierungsmaßnahmen selbst – dokumentiert worden sind [5]. Angaben dazu sind an die Denkmalpflege erfolgt. Unter anderem wurden Reste von früheren Fundamenten im Haupt- und nördlichen Seitenschiff sowie eine Nische in der Außenwand entdeckt. Die Schiefstellung einiger Pfeiler [6] und gravierende Risschäden an den gemauerten Scheidbögen wurden durch den Einsatz moderner Messtechnik festgestellt. Der Dachstuhl wies neben extremen tragfähigkeitsgefährdenden Schäden auch einen Hausschwammbefall auf und das Gewölbemauerwerk wurde zusätzlich durch einen etwa 10 Tonnen schweren Schornstein belastet.

### 3 Problemstellung/Ziele

Die Kirche St. Michael in Elsdorf-Berrendorf ist überwiegend aus Ziegelmauerwerk errichtet worden. Sie ist mit Kreuzrippengewölben eingewölbt, die aus Mauerziegeln (historisch) und Bimssteinmauerwerk (neuzeitlich) bestehen. Insbesondere die Mauerziegelgewölbe wiesen deutlich sichtbare Putzveränderungen (Ausblühungen, Absanden) auf, die auf baustoffbeanspruchende Prozesse im Gewölbemauerwerk hindeuteten. In den Mauerziegelgewölben wurden erhöhte baustoffschädliche Salzgehalte ermittelt. Die „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ waren aufgrund einer reduzierten Baustofffestigkeit in ihrer Tragfähigkeit beeinträchtigt. Die Natursteinrippen im Bereich der Mauerziegelgewölbe standen zum Teil nicht im Verbund zum Gewölbemauerwerk und konnten teilweise von Hand bewegt werden.

Darüber hinaus waren konstruktive, die Standsicherheit der Kirche und insbesondere des Gewölbemauerwerks gefährdende Probleme gegeben.

Die Gesamtsituation der Kirche machte es erforderlich, jeden einzelnen Beanspruchungsprozess möglichst genau zu kennen und anhand von langandauernden Eignungsversuchen die Wirkung von bewährten und/oder neu entwickelten Instandsetzungskonzepten im Sinne des Erhalts dieser einzigartigen Gewölbe zu prüfen. In Zusammenarbeit mit allen an der Instandsetzung Beteiligten wurde dann auf Grundlage der Untersuchungsergebnisse eine Instandsetzungsmethodik ausgewählt, die den Erhalt der kulturhistorisch bedeutenden Gewölbe ermöglichte.

Nachfolgend werden die praxisbezogenen Forschungsergebnisse, die schließlich in die Instandsetzung des Gebäudes eingeflossen sind, dargestellt und in ihrer Bedeutung für die restauratorische Instandsetzung der Kirche St. Michael erläutert. Die Forschung zu den neu entwickelten Instandsetzungsstoffen und -verfahren wird in Abschnitt 6 genauer beschrieben.

Ziel aller Maßnahmen war und ist es, die kulturhistorisch bedeutenden Bauteile nicht nur in ihrer architektonischen Aussagekraft zu erhalten, sondern die handwerklich-geschichtlichen Spuren der Handwerker zu bewahren, die früher als Baumeister einen wesentlichen handwerklichen, aber auch planerischen Anteil an der Errichtung eines solchen Bauwerks hatten. Ihr Geist und ihr handwerkliches Geschick werden in jedem der noch vorhandenen Bauteile bewahrt – auch dann, wenn diese Bauteile nicht mehr überall sichtbar sind. Jede Veränderung (z. B. Verformung, Erneuerung) eines Gebäudebauteils (z. B. die Schiefstellung der Pfeiler, Erneuerung eines Seitenschiffgewölbefeldes, unterschiedliche Oberflächenverläufe der Gewölbe) ist ein Teil der Geschichte des Bauwerks.

#### 4 Zustand des Gewölbemauerwerks

Um die in der Kirche wirkenden Schadensprozesse erfassen und darauf abgestimmt ein Instandsetzungskonzept entwickeln zu können, ist das Mauerziegelgewölbe aus dem 16. Jahrhundert u. a. im Rahmen eines Eignungsversuchs an einem Gewölbeprobefeld nach vorheriger Abstützung und anschließender Abnahme des Wärmedämmmörtels hinsichtlich der wirkenden Beanspruchungsmechanismen (Feuchte- und Salzbeanspruchung, Klimaverhältnisse) untersucht worden. An der Kirche wurden an verschiedenen Stellen Proben entnommen, sowohl zur chemisch-mineralogischen Bestimmung des baustoffschädlichen Salzgehalts als auch zur Bestimmung der physikalisch-mechanischen Eigenschaften von einzelnen Baustoffen.

Die Untersuchungen haben in den Mauerziegelgewölbem des 16. Jahrhunderts und in den Mauern, die über die Mauerziegelgewölbe hinausragen, einen deutlich erhöhten Gehalt an baustoffschädlichen Salzen ergeben (Bild 3); unterhalb des Gewölbes wurden diese erhöhten Gehalte in den Pfeilern und Wänden nicht mehr festgestellt, sodass die Vermutung nahe lag, dass im Dachraum evtl. auch auf dem Gewölbe Stoffe gelagert worden sind, die den Schadstoffeintrag begünstigt haben. Inwieweit dies zutrifft und/oder ob sich im Dachraum z. B. Tiere (z. B. Taubenkot) aufgehalten haben, konnte anhand der zur Verfügung stehenden Unterlagen nicht mehr ermittelt werden.

In den „Kalk-Bimsstein-Gewölbem“ aus dem Anfang des 20. Jahrhunderts konnten die Schadstoffe nicht nachgewiesen werden.

Die Restsubstanz der noch vorhandenen Mauerziegel (s. auch Bilder 3 und 4) war z. T. schalig, abmehlend, z. T. noch fest. Insofern ergaben u. a. Druckfestigkeitsprü-

fungen an den Resten der Mauerziegel sehr unterschiedliche Festigkeitswerte. Der Mörtel zwischen den Mauerziegeln war von seiner Festigkeit her nicht mehr prüfbar, sondern konnte teilweise mit den Fingern aus den Fugen gekratzt werden.

Die Festigkeitsprüfung an dem „Kalk-Bimsstein-Gewölbemauerwerk“ ergab für die Mörtel eine Festigkeit, die etwa der Mörtelgruppe II bis IIa (M 2,5 bis M 5) entsprach, während einige der „Kalk-Bimsstein“-Proben aus den Gewölbekappen aufgrund ihrer minderfesten Substanz nicht prüfbar waren; die Bimsstein-Prüfkörper aus den Gewölbeanfängern waren hingegen noch prüfbar und gaben einen Anhaltswert für die Festigkeit der Kalk-Bimssteine vor der Beanspruchung (s. auch Bild 14).

Das Mauerziegelgewölbe wies keine Oberlastrippen und Wandaufleger auf. Das „Bimsstein-Gewölbe“ hatte zwar Oberlastrippen, diese ließen sich aber von Hand abbröseln und wiesen extreme Fehlstellen auf. Auch das „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ war sowohl im Anfängerbereich der Gewölbe als auch den Kappen nicht in Verzahnung bzw. als Auflager mit dem Umgebungsmauerwerk ausgeführt worden. Die Gewölbe wurden also durch den Gewölbeschub bzw. die „Reibung“ an bzw. auf den „aufgehenden“ Wänden gehalten. Jede größere Formänderung, z. B. aufgrund von Setzungen (in der Nähe ist ein Braunkohletagebau und das Gebäude liegt im Erdbebengebiet), hätte zum Versagen der Konstruktion führen können, so wie es offenbar vor mehreren Jahrzehnten bereits fast geschehen wäre – wie sich im Rahmen der Instandsetzung herausstellte.

So deuten die Schiefstellung einzelner Pfeiler, die im Rahmen der Vermessung per Laserscan [6] festgestellt worden ist, und die Risse in den Scheidbögen – neben anderen Beanspruchungen – auf eine kurzzeitige, er-

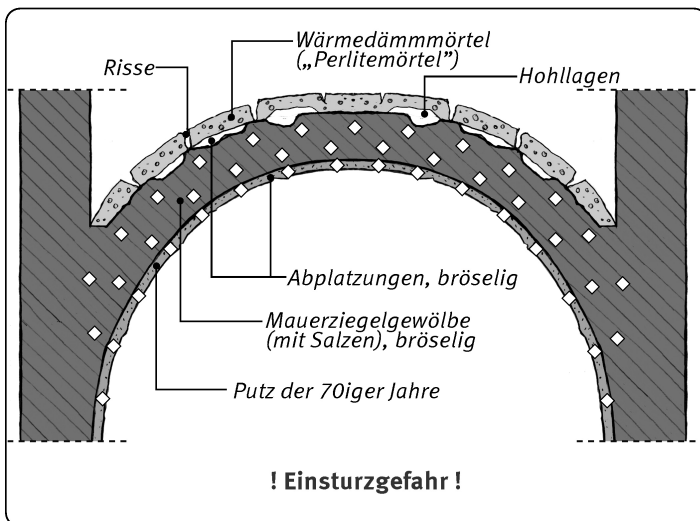


Bild 3. Zustand des Gewölbemauerwerks (Querschnitt, Systemskizze mit Darstellung der zuvor durchgeführten Abstützung)



**Bild 4.** Zustand (Restquerschnitt teilweise nur noch etwa 5 bis 6 cm stark) des Gewölbemauerwerks (Gewölberücken) nach Abnahme des Wärmedämmmörtels und Reinigung

höhte Belastung hin, die nicht von der Baukonstruktion allein gekommen sein kann, sondern auch von einer extremen äußeren Belastung herrühren muss. Die sichtbaren Veränderungen und entsprechende Berechnungen veranlassten den Tragwerksplaner, Edelstahlzugstangen zwischen den Gewölbeanfängern einbauen zu lassen und mit einer vorgegebenen Last vorzuspannen.

## 5 Restauratorische Instandsetzung des Gewölbemauerwerks

Vor der Instandsetzung der gesamten Gewölbe sind zuerst mittels ausgewählter Instandsetzungsstoffe und -verfahren Eignungsversuche an einem Gewölbefeld ausgeführt und über einen Zeitraum von etwa fünf Jahren nachuntersucht worden. Erst nachdem diese Versuche erfolgreich waren, entschied man sich im Sinn des Erhalts der historischen Gewölbe für die restauratorische Instandsetzung des gesamten Gewölbemauerwerks (Mauerziegelgewölbe und „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“) in der im Rahmen des Eignungsversuchs erprobten Art und Weise.

Die Instandsetzung der historischen Gewölbe umfasst im Wesentlichen vier Hauptmaßnahmen, deren grundsätzliche Funktionsfähigkeit im Hinblick auf den Erhalt der historischen Gewölbe nachfolgend genauer erläutert wird (Bild 5).

### 5.1 Maßnahme 1 – Konsolidierung (Tränkung) des Gewölbemauerwerks

Die stark mit baustoffschädlichen Salzen belasteten Natursteinrippen des Mauerziegelgewölbes aus dem 16. Jahrhundert sind mit einem speziellen Kompressenputz versehen worden, der einen Teil der im Naturstein vorhandenen Salze aufnehmen sollte. Dabei war von vornherein klar, dass mit dieser Methode i. d. R. keine vollständige „Entsalzung“ der Natursteinrippen erfol-

gen kann und so später wieder mit Ausblühungen an den Natursteinrippen zu rechnen ist.

Das vorhandene, in seiner Tragfähigkeit z. T. sehr stark eingeschränkte Gewölbemauerwerk (Mauerziegelgewölbe, „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“) ist anschließend, vor der weiteren Konsolidierung, mit speziellen Lehrbögen, abgekoppelt vom Arbeitsgerüst, bis auf den Kirchenboden abgefangen worden. Anschließend ist der auf dem Gewölbe befindliche Wärmedämmputz („Perlitmörtel“; s. auch Bild 3) abgenommen und entsorgt worden. Lose Teile sind vom Gewölbe, soweit sie nicht erhaltenswürdig waren, abgenommen und das Gewölbe ist insgesamt substanzschonend gereinigt worden (s. auch Bild 4).

Die Lastabtragung aus dem Gewölbemauerwerk (u. a. Gewölbeschub) verläuft im Wesentlichen vom Hauptschiff über die Seitenschiffgewölbe in die äußeren Strebepfeiler und schließlich in die Fundamente. Aus diesem Grunde wurden zuerst die Gewölbe des nördlichen und südlichen Seitenschiffs mit dem speziellen CVS-Gewölbetränkstoff [7, 8] mittels einer speziellen Technik stufenweise so getränkt, dass eine gleichmäßige Durchtränkung des Gewölbemauerwerks vom Gewölberücken bis zur Gewölbelaubung erreicht worden ist (Bild 6). Dies machte es erforderlich, dass die Tränkung selbst immer wieder in ihrer Intensität und in ihrem Tränkverfahren auf die jeweilige Situation abgestimmt werden musste. Der CVS-Gewölbetränkstoff führte zu keinem Porenverschluss.

Nach den Seitenschiffgewölben wurden auch die Hauptschiff- und das Chor- und Querschiffgewölbe in gleicher Weise behandelt. Nach mehreren Monaten und nach etwa 1 1/2 Jahren wurden an allen so behandelten Gewölben Proben entnommen und hinsichtlich ihrer Tragfähigkeit (Druckfestigkeit) untersucht. Die Prüfungen zeigten eine dauerhaft erhöhte und auch von den Verformungseigenschaften her eine akzeptable Festigkeit. Begleitende Untersuchungen ergaben zudem, dass die Dauerhaftigkeit auch bei den erhöhten baustoffschädlichen Salzgehalten gegeben ist.

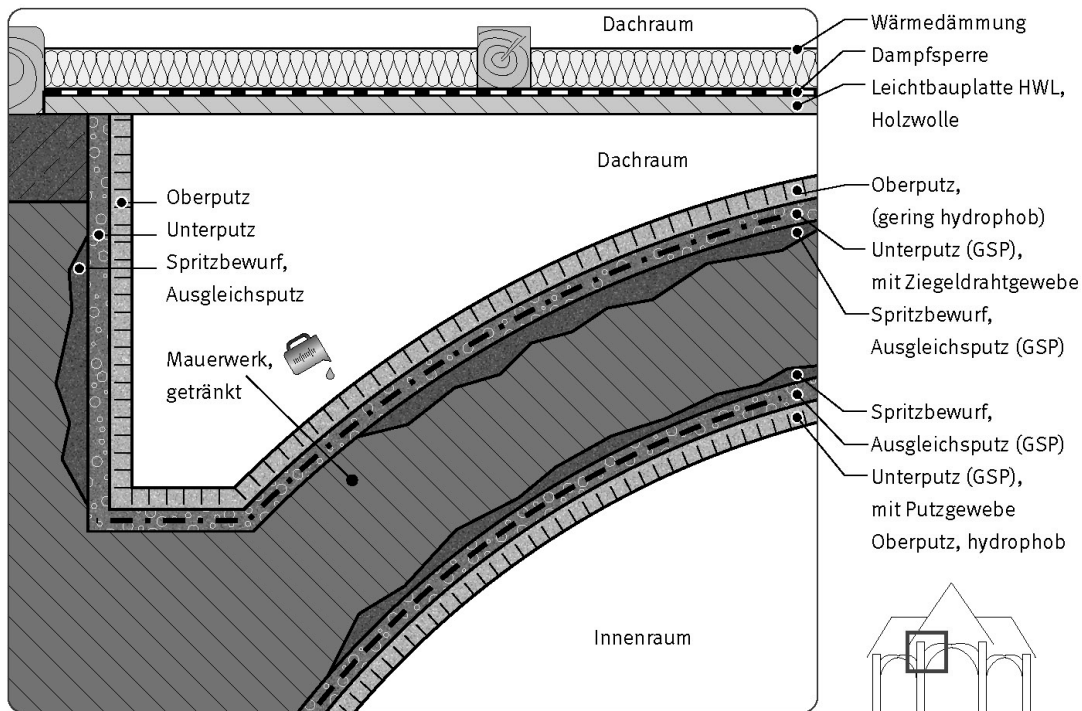


Bild 5. Übersicht über die am Gewölbemauerwerk durchgeführten restauratorischen Instandsetzungsmaßnahmen (Systemskeizze)

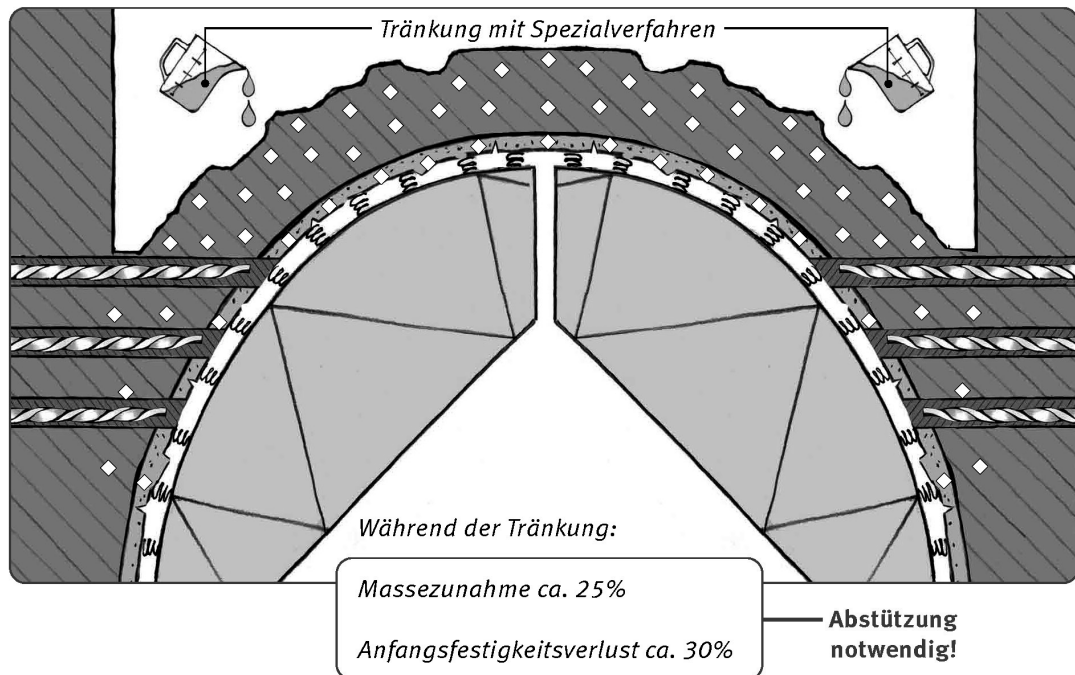


Bild 6. Tränken des Gewölbemauerwerks vom Gewölberücken bis zum Durchdringen des Tränkstoffes an der Gewölbelaibung (Systemskeizze)

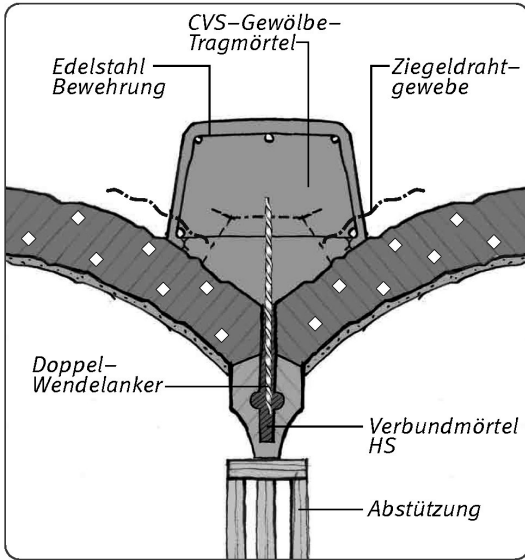


Bild 7. Einbau sogenannter Oberlastrippen mit Rückverankerung der Natursteinrippen mittels Doppel-Wendelankern [9]

## 5.2 Maßnahme 2 – Aufbringen von Oberlastrippen und Zugankern<sup>1)</sup>

Nachdem der CVS-Gewölbebrückstoff genügend ausreagiert war, sind die Gewölberippen mittels sogenannter Doppel-Wendelanker [9], die in einen speziellen CVS-Verbundmörtel [10] eingebettet worden sind, rückverankert und die Gewölbeanfänger sind mit einem ähnlichen Verfahren am „aufgehenden“ Mauerwerk gesichert worden, da diese nicht im Verbund zum Mauerwerk ausgeführt worden sind (Bild 7).

Nach Durchführung dieser Arbeiten erfolgte der Einbau der vom Tragwerksplaner vorgegebenen Zugstangen, auf die zur Messung der tatsächlich vorhandenen Spannungen Dehnungs-Mess-Streifen (DMS) appliziert und über nahezu die gesamte Instandsetzungszeit gemessen worden sind. Nach dem Einbau der Zugstangen erfolgte dann die Anordnung von sogenannten Oberlastrippen aus einem bewehrten Leichtmörtel, der mit den im Gewölbe vorhandenen Schadstoffen verträglich ist und von der Verformbarkeit (u. a. E-Modul) auf die behandelten (konsolidierten) Gewölbemauerwerkeigenschaften abgestimmt ist (s. auch Bild 7).

Die Spannungsänderungen, die sich aus diesen Arbeiten in den Zugstangen ergeben haben, wurden ebenso mittels der DMS-Messungen erfasst, wie die Sicherungsarbeiten am Dachstuhl über den Gewölben. Es zeigte sich, dass die Zugspannungen in den Zugstangen im Laufe der Instandsetzungsphase schwankten und mehr und mehr abbauten, bis ein Zustand erreicht worden ist, wo keine bzw. nur noch geringe Zugspannungen in den

17 eingezogenen Anker vorhanden waren. Als auch nach einem 2. und 3. Nachspannen der Anker die Zugspannungen in den Anker immer wieder abnahmen, wurde entschieden, sogenannte Spannkraftregler [1, 2] zu entwickeln, die sicherstellen sollten, dass eine ständige, möglichst konstante Zuglast in den Anker gehalten werden kann.

Der Einbau dieser Spannkraftregler an zwei Spannankern führte im Messzeitraum zu einer nahezu konstanten Zuglast in den Spannankern, während die anderen Zuganker z. T. wieder deutliche Spannungsänderungen aufwiesen (s. auch Abschn. 6.2.6).

## 5.3 Maßnahme 3 – Auftrag eines Gewölbe-Stütz-Putzsystems

Auf den Gewölberücken wurde nach Abschluss der zuvor beschriebenen Maßnahmen von einem sogenannten Gewölbe-Stütz-Putzsystem zunächst der Ausgleichsputz, zur Egalisierung der Lunkerstellen und tiefgreifenden Schadstellen, aufgebracht. Nachdem dieser Putz ausgehärtet war, wurde der an der Gewölbelaibung offenbar aus den 1970er-Jahren stammende und mit baustoffschädlichen Salzen angereicherte Putz vorsichtig abgenommen. Im Wechsel zwischen Gewölbelaibung und Gewölberücken und unter Berücksichtigung der Standzeiten zwischen den einzelnen Putzlagen wurde dann das Gewölbe-Stütz-Putzsystem vollständig aufgetragen (s. Bild 5). In den Unterputz ist bewusst ein Putzträger bis in die Oberlastrippen geführt worden, um eine entsprechende Tragwirkung bzw. einen Lastabtrag zu erzielen.

Erst nachdem gewährleistet war, dass der Gewölbe-Stütz-Putz nahezu durchkarbonatisiert, sicher tragfähig und der Dachstuhl ausreichend gesichert war, wurden

1) nach Vorgabe von Herrn Dipl.-Ing. Billen

die Lehrbögen unter den Gewölben entfernt. Das Gewölbe, bestehend aus getränktem Mauerwerk und Gewölbe-Stütz-Putz (s. Bild 5), hatte damit die Möglichkeit, sich zu „setzen“ und die wesentlichen Schwind- und insbesondere Kriechverformungen abzubauen. Dieser Gewölbe-Stütz-Putz (bisher ohne Oberputzauftrag) war bereits in der Lage, Schadsalze aus dem Gewölbemauerwerk aufzunehmen und damit die salzbedingte Beanspruchung im Gewölbemauerwerk zu reduzieren. Auf dem Gewölberücken wurde anschließend ein in seinen Eigenschaften angepasster, faserhaltiger Oberputz, ebenfalls mit einem hohen Widerstand gegen Schadsalz, erst nach der Fertigstellung aller übrigen Arbeiten – auch an den Gewölberippen und nachdem die wesentlichen Formänderungen an den Gewölben abgebaut waren – auf den oberflächenaufgerauten Unterputz aufgebracht.

#### 5.4 Maßnahme 4 – Einbau der Klimatebene

Untersuchungen haben ergeben, dass die Schadsalze selbst in einem scheinbar „trockenen“ Gewölbemauerwerk, in Abhängigkeit von den umgebungsklimatischen Bedingungen, in einem ständigen Richtungswechsel transportiert werden und damit auf die Gewölbesubstanz beanspruchend wirken (s. auch [20]). Um auch diesen klimatischen Einfluss deutlich zu reduzieren, wurde eine vom Gewölbemauerwerk abgekoppelte „Klimatebene“ über den Gewölben so entwickelt und aufgebaut, dass im Zusammenhang mit einer in der Kirche vorhandenen „intelligenten Lüftung“ eine Vergleichmäßigung des Klimas unterhalb und oberhalb des Gewölbes erreicht werden konnte und damit die Salztransporte im Gewölbe selbst weitgehend zum Stillstand kommen bzw. die Beanspruchung auf das Gewölbemauerwerk aus den baustoffschädlichen Salzen deutlich reduziert wird (s. Bild 5). Die Klimatebene wurde bewusst nicht so konzipiert, dass sie der Energieeinsparverordnung entspricht, da dann – infolge der zwangsläufig an diesem Bauwerk entstehender Wärmebrücken, aber auch infolge einer klimatischen Abkopplung von historischen Bauteilen vom Energiefluss – kulturhistorische Substanz beansprucht, geschädigt und letztendlich für die Nachwelt verloren geht. Die Klimamessungen, die nach dem Einbau der Ebene erfolgt sind, deuten darauf hin, dass eine Vergleichmäßigung des Klimas unter anderem durch den Abbau von Luftfeuchtespitzen und einer Anpassung der Temperatur zwischen der Klimatebene und dem Gewölbe mit der Kircheninnenraumtemperatur gegeben ist. Die Messungen werden derzeit auch noch nach Abschluss der Instandsetzungsmaßnahmen fortgeführt.

## 6 Forschung und Entwicklung

Die im Folgenden dargestellten Forschungen sind in Eigenfinanzierung bzw. durch die Unterstützung der katholischen Kirchengemeinde St. Michael und des

Erzbistum Köln und einzelner Produkthersteller sowie Instandsetzungsfirmen erfolgt. Die Ergebnisse sind in der Kirche St. Michael zur Rettung vor dem Abriss bedrohter Mauerziegelgewölbe aus dem 16. Jahrhundert verwendet worden. Die Wirkung der einzelnen Instandsetzungsstoffe und Instandsetzungsmaßnahmen ist ständig geprüft worden.

### 6.1 Tragfähigkeitserhöhung von Gewölbemauerwerk – Maßnahme 1 und 3<sup>2)</sup>

Um die Wende vom 19. zum 20. Jahrhundert wurden die Gewölbe vieler Kirchen im Rheinland mit „Kalk-Bimssteinen“ errichtet. Nach nun annähernd hundert Jahren Standzeit werden an vielen dieser Gewölbe Schäden festgestellt, die sich auf Veränderungen der Materialeigenschaften infolge verschiedenartiger Beanspruchungen zurückführen lassen. Diese Eigenschaftsänderungen der Baustoffe können langfristig zum Versagen des Gewölbemauerwerks beitragen [11]. Um solche einzigartigen „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ soweit wie möglich zu erhalten, ist in den letzten Jahren das sogenannte Tränkungsverfahren zur Tragsicherheits-erhöhung der historischen „Kalk-Bimssteine“ entwickelt worden, das sich inzwischen auch langfristig bewährt hat. Es wurde daher darüber nachgedacht, ob dieses Verfahren auch für den Erhalt des historischen, „versalzten“ Mauerziegelgewölbes der Kirche St. Michael angewendet werden kann.

Die Untersuchungsergebnisse, die für das „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ ermittelt worden sind, werden nachfolgend vorgestellt. Im Anschluss daran werden die Untersuchungsergebnisse für die Mauerziegelgewölbe hinsichtlich der Trängung erörtert. Im engen Zusammenhang mit der Tragfähigkeitserhöhung ist die Wirkung der baustoffschädlichen Salze im Gewölbemauerwerk zu sehen. Ein Ziel war es, die Salze in der Konstruktion, aber auch die Beanspruchungsprozesse zu reduzieren. Dazu wurden ebenfalls entsprechende Forschungsaktivitäten durchgeführt; die wesentlichen Ergebnisse werden dargestellt.

#### 6.1.1 „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“

Das von [14] entwickelte Tränkungsverfahren zur Tragfähigkeitssteigerung von Mauerwerk, das in der Kirche St. Michael für den Erhalt der historischen Mauerziegel- und „Kalk-Bimsstein“-Gewölbe eingesetzt worden ist, ist im Vorfeld an einer anderen Kirche u. a. unter baupraktischen Bedingungen an historischen „Kalk-Bimsstein-Gewölben“ und unter labortechnischen Bedingungen an Mauerwerkprüfwänden und Stein- und Mörtelprüfkörpern angewendet und untersucht worden. Die Untersuchungen und die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt.

2) Mitautor: P. Schubert., R. Rankers, und T. Kubanek, Aachen



**6.1.1.1 Baupraktische Untersuchungen – Messungen am Gewölbemauerwerk**

Für die baupraktischen Untersuchungen wurde ein historisches, in seiner Tragfähigkeit deutlich vermindertes Gewölbe aus „Kalk-Bimssteinen“ zur Bestimmung von Kriech- und Schwindverformungen infolge von Neuaufmauerungen und Tränkungsmaßnahmen ausgewählt. Um die verschiedenartigen Verformungen, die an dem historischen Gewölbe infolge von Instandsetzungsmaßnahmen auftreten, erfassen zu können, sind an der Gewölbeunter- und -oberseite digitale Wegaufnehmer installiert worden (Bild 8). Mittels dieser Wegaufnehmer konnten über eine Rechneinheit permanent die Formänderungen des Gewölbemauerwerks während der Instandsetzungsmaßnahme erfasst werden.

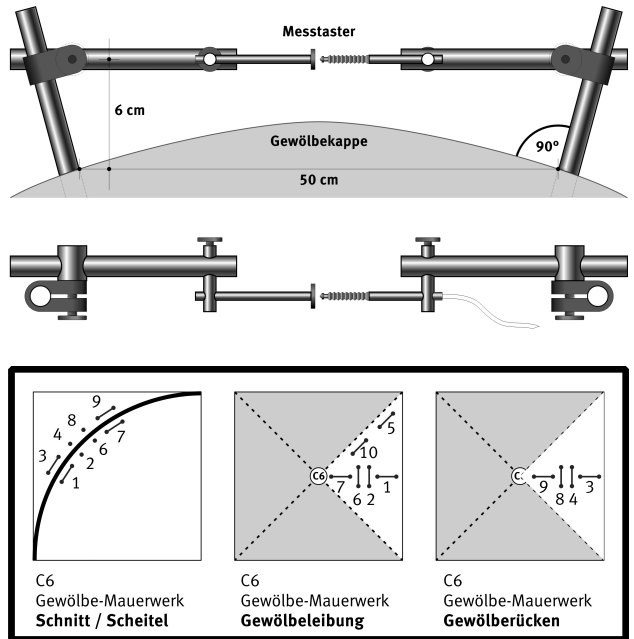
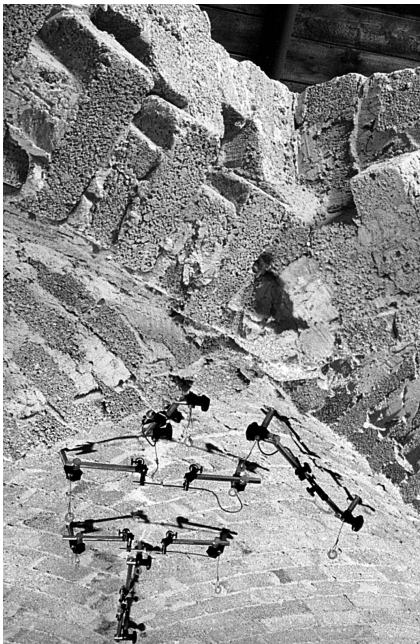
**6.1.1.2 Laboruntersuchungen – Messungen an Laborprüfwänden**

Mittels Laboruntersuchungen sollte an verschiedenen Mauerwerkprüfkörpern aus bimssteinhaltigem Mauerwerk (Bild 9) untersucht werden, wie sich Tränkungsmaßnahmen mit Wasser und dem speziell entwickelten CVS-Gewölbetränkstoff auch unter Last auswirken. Hierzu wurden u. a. ungetränkte und mit dem CVS-Gewölbetränkstoff bzw. beim zementgebundenen Bimsstein (ZB) mit Wasser getränkte Prüfkörper aus historischen (KBh), nachgestellten (KBn) „Kalk-Bimssteinen“ und zementgebundenen Bimssteinen (ZB) untersucht.

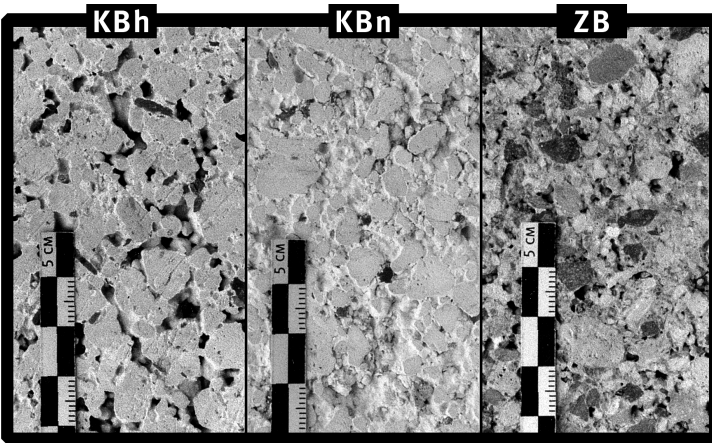
Zusätzlich sind Mauerwerkprüfwände (Bild 10) aus o. g. Baustoffen (s. auch Bild 9) hergestellt worden, um die Formänderungen, die am historischen Gewölbe gemessen werden, mit den Formänderungen an den Laborprüfwänden, an denen verschiedene Lastvorgänge nachgestellt worden sind, zu vergleichen. Betrachtet werden dabei die Formänderungen des Mauerwerks insgesamt und die der einzelnen Baustoffe (Kalk-Bimsstein, Mauermortel).

**6.1.1.3 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse Baupraktische Untersuchungen**

Die historischen Gewölbe sind vor der Tränkung mittels Lehrbögen gesichert worden. Die Formänderungen an dem „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ (Bild 11) sind vor, während und nach der Tränkung sowie während und nach dem Ausschalen des Gewölbes gemessen worden. Die Werte in Bild 11 geben die Messergebnisse mit Beginn der Tränkungsmaßnahme, unterschieden nach Gewölbeunter- (Gewölbelaibung) und Gewölbeoberseite (Gewölberücken), wieder und werden nachfolgend kurz beschrieben und beurteilt. Die genaue Bezeichnung und Lage der Messstellen MS<sub>i</sub> ist Bild 8 zu entnehmen. Einen deutlichen Einfluss auf die Formänderungsmessungen und, wie sich durch Messungen an der Kirche St. Michael herausgestellt hat, auch auf den gesamten Spannungszustand im Gewölbe haben die herrschenden Klimaverhältnisse, auf die hier nicht näher eingegangen wird.



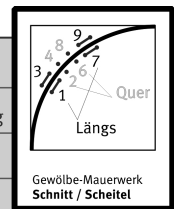
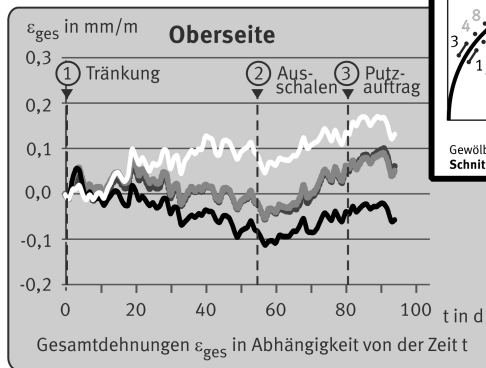
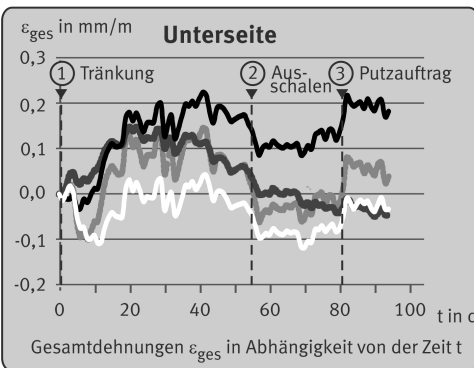
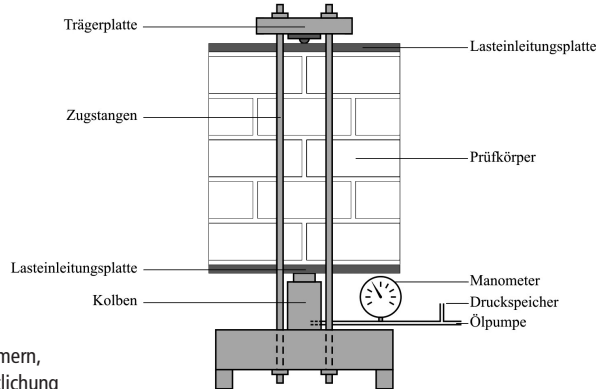
**Bild 8.** Aufbau (oben, rechts) und Lage (links und unten, rechts) der digitalen Wegaufnehmer im Gewölbe



**Bild 9.** Laborprüfkörper aus historischen Kalk-Bimssteinen (KBh), nachgestellten Kalk-Bimssteinen (KBn) und zementgebundenen Bimssteinen (ZB)



**Bild 10.** Mauerwerkprüfwände mit applizierten Wegaufnehmern, hergestellt aus KBh und ZB (links); Systemskizze zur Verdeutlichung des Versuchsaufbaus (rechts)



— MS 1 (unten) / 3 (oben) Längsrichtung  
 — MS 2 (unten) / 4 (oben) Querrichtung

— MS 6 (unten) / 8 (oben) Querrichtung  
 — MS 7 (unten) / 9 (oben) Längsrichtung

**Bild 11.** Formänderungsverlauf  $\epsilon_{ges}$  in mm/m der „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ nach Tränkung unter baupraktischen Bedingungen in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in d

### *Gewölbelaibung (Unterseite)*

Die Formänderungsmessungen an der Gewölbeunterseite sind vom zeitabhängigen Verlauf ähnlich wie an der Oberseite, allerdings – wie unten erläutert – deutlich ausgeprägter.

Nach der Tränkung mit dem CVS-Gewölbetränkstoff ist ein deutliches Quellen an der Unterseite, insbesondere in der Querverformung (MS 2/6) erkennbar; in der Längsverformung (MS 1/7) tritt zunächst ein Quellen, anschließend ein langsames Schwinden bis zum Ausschalen der Lehrbögen ein (Bild 11). Diese Dehnung ist an der Gewölbeoberseite geringer als an der Gewölbeunterseite. Nach dem Ausschalen treten die Formänderungen (Zusammendrücken) nahezu schlagartig auf. Anschließend ist die weitere Verformung infolge Kriechen an der Gewölbeunterseite so lange gering, bis der Putz aufgetragen wird.

Durch die Massezunahme infolge des Feuchteintrags, aber auch infolge des Putzauftrags, wäre ein weiteres Zusammendrücken des Gewölbes zu erwarten gewesen, so wie es sich auch an den Prüfwänden im Labor gezeigt hat. Am Gewölbe selbst wurde allerdings, wahrscheinlich gerade durch die Feuchtevorbehandlung und den Feuchteeintrag infolge der Putzarbeiten, ein Quellen von nahezu 0,1 mm/m gemessen. Aus eigenen Untersuchungen [13] ist bekannt, dass die Feuchteabgabe von Putzsystemen über den gesamten Putzquerschnitt und aus dem Putzgrund sehr lange dauern kann [14, 29]. In dieser Zeit kann der Putz erhärten und schwinden; die Messungen zeigen allerdings, dass die Schwindprozesse des Putzes geringer sind als das Quellen des Gewölbemauerwerks durch den Putzauftrag. Durch den Putzauftrag und die anschließende Erhärtung findet also eine Spannungsumlagerung aus dem Mauerwerk auch in den Putz statt; der Putz trägt in diesem Falle mit, was man sich für die Gewölbe in der Kirche St. Michael zunutze gemacht hat, um ein Mittragen der CVS-Gewölbe-Stütz-Putzsysteme zu erreichen. Zahlreiche eigene Untersuchungen haben gezeigt, dass viele der geschädigten, historischen „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ nur noch durch den Putz gehalten werden und demzufolge in der Standsicherheit gefährdet sein können, wenn diese „Tragebene“ abgenommen oder geschädigt wird.

### *Gewölberücken (Oberseite)*

Die Tränkung selbst, die über einen längeren Zeitraum (mehrere Wochen) in einem (auf die speziellen Gewölbeeigenschaften angepassten) speziellen Tränkverfahren durchgeführt worden ist, führt an der Gewölbeoberseite längs, in Gewölbefallrichtung (vom Gewölbescheitel zum Gewölbeanfänger) zu einem Quellen im Bereich des Gewölbeanfängers und zu einem Zusammendrücken bzw. Zusammenziehen im Bereich des Gewölbescheitels (MS 3/9, s. auch Bild 11). Quer zur Gewölbefallrichtung ist zu Beginn ebenfalls ein leichtes Quellen (MS 4/8), anschließend aber eine Schwindverformung festgestellt worden.

Das Entfernen der Lehrbögen unter den Gewölben, nach Abschluss der Tränkungsmaßnahme nach etwa 55 Tagen, führt an der Oberseite des Gewölbes zu einer Dehnung. Als Erklärungsansatz könnte u. a. eine geringfügige Durchbiegung des Gewölbemauerwerks, die sich nach Abnahme der Lehrbögen eingestellt hat und an den Messfühlern zu einem Vergrößern der Messstrecke an der Oberseite geführt hat, herangezogen werden.

### **Laboruntersuchungen**

Das Anfangsquellen, das unmittelbar während und nach der Tränkung am Gewölbe festgestellt worden ist, ist auch an den Laborprüfwänden (s. auch Bilder 12 und 13) feststellbar. Anschließend findet ein „Schwinden“ statt. Die „Schwindmaße“ der Laborprüfwände liegen absolut bei etwa 0,30 mm/m.

An der Prüfwand ist ein messbarer Kriecheinfluss (Verkürzung der Messstrecke) erst ab einem Prüfalter von etwa fünf Monaten nach der Tränkung feststellbar.

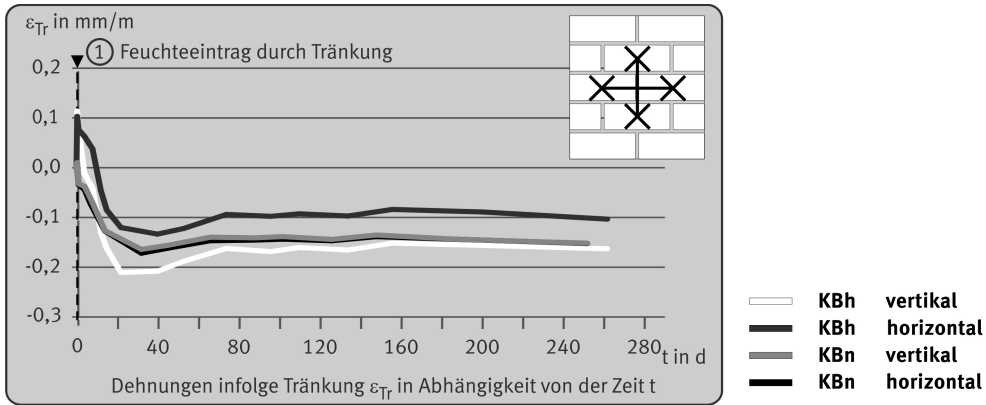
Die Laboruntersuchungen bestätigen daher die Praxisuntersuchungen dahingehend, dass getränkte „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“ – wie neu aufgemauerte Gewölbe – erst nach mehreren Monaten Standzeit mit einem Putz versehen werden dürfen, da neben den Feuchteabgabeprozessen noch eine deutliche Gewölbeformänderung durch Kriechverformungen stattfindet, die in Putzen zu Rissbildungen beitragen kann. In die Planung einbezogen wurde daher der Auftrag eines verträglichen und risssschließenden Anstrichs nach mehreren Jahren Standzeit.

### *Historischer „Kalk-Bimsstein“*

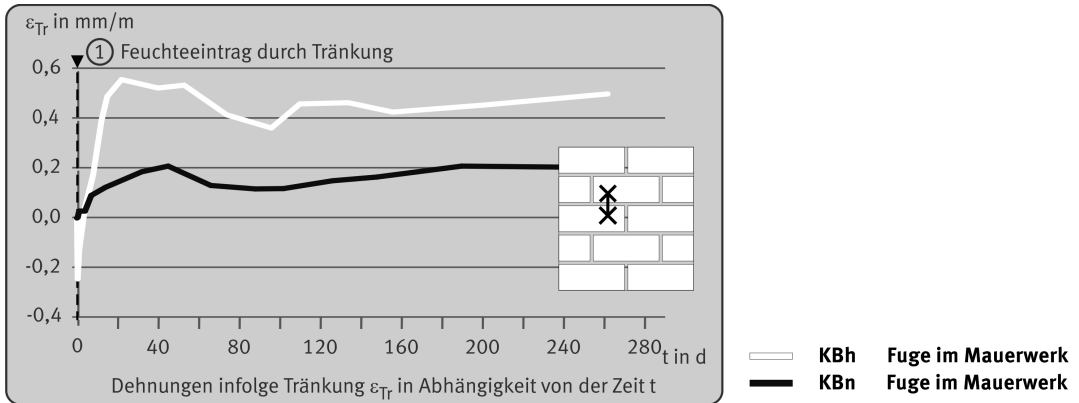
Die Tränkung der in Bild 12 dargestellten Laborprüfwände, in Anlehnung an die Tränkung der historischen Gewölbe, führt bei den historischen Kalk-Bimsstein-Wänden (KBh) wie auch bei einer Wassertränkung unmittelbar nach der Tränkung zu einem Quellen von 0,10 bzw. 0,05 mm/m. Anschließend setzt dann eine Verkürzung („tränkmittelbedingtes Schwinden“) von bis zu 0,40 mm/m ein. Dieses „Schwinden“ bzw. „Zusammendrücken“ ist bei der Formänderung in Lastrichtung (vertikal) größer als quer zur Lastrichtung (horizontal). Ein ähnliches Verhalten konnte bei der Tränkung mit Wasser festgestellt werden.

### *Mauermörtel*

Im Mauerwerk der Prüfwand selbst findet durch die Tränkung anfangs nur ein geringes Quellen statt, das im Zuge der weiteren Prüfdauer deutlich zunimmt (Bild 13). Offenbar findet in dem kalkreichen Mörtel (nicht karbonatisierten Mörtel) in Verbindung mit dem Tränkstoff eine Reaktion statt, die zum Quellen führt. Diese Quellverformung findet nur in der Anfangsphase statt und war am Gewölbe selbst nicht messbar, evtl. weil der Mörtel am historischen Gewölbe durchkarbonatisiert ist.



**Bild 12.** Formänderungsverlauf  $\varepsilon_{Tr}$  in mm/m der „Kalk-Bimssteine“ der Prüfwand nach Tränkung unter Laborbedingungen in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in d



**Bild 13.** Formänderungsverlauf  $\varepsilon_{Tr}$  in mm/m des Mörtels der Prüfwand nach Tränkung unter Laborbedingungen in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in d

#### 6.1.1.4 Zusammenfassung

Die Tränkung von „Kalk-Bimsstein-Gewölben“ führt, wie wir heute durch Langzeituntersuchungen wissen, zu einer langzeitigen tragfähigkeitserhöhenden Wirkung. Mit der Tränkung sind verschiedene Formänderungsprozesse am Gewölbemauerwerk (z. B. Anfangsquellen, „tränkungsbedingtes Schwinden“) verbunden.

Die Kriechverformungen, die sich aus dem Tränken ergeben, sind geringer als die Verformungen nach dem Neuaufmauern eines Gewölbes, müssen aber dennoch in Bezug auf die weiteren Arbeiten (z. B. Putz- und Farbauftrag) berücksichtigt werden. Vor einem Putzauftrag müssen ähnlich lange Wartezeiten einkalkuliert werden, wie bei der Neuaufmauerung. Die Standzeit bis zum Putz- bzw. Farbauftrag ist abhängig von den Stein- und Mörtel Eigenschaften, der Konstruktion selbst (z. B.

Dicke, Spannweite) und von den umgebungsklimatischen Bedingungen. In der Regel muss – wie nach der Neuaufmauerung eines Gewölbes auch – nach mehreren Jahren grundsätzlich zusätzlich auch noch ein rissüberbrückender Anstrich vorgesehen werden, wie Kriechuntersuchungen [11] gezeigt haben.

Die positive Wirkung der Tränkung auf die Tragfähigkeitserhöhung eines Gewölbes kann durch einen speziellen Putzauftrag (besondere Putzmörtelrezeptur) zusätzlich positiv beeinflusst werden, da die durch den Putzauftrag feuchtebedingte Dehnung mit dem anschließenden sehr langsamen Schwinden, zu einer Spannungsumlagerung in den Putz führen kann.

## 6.1.2 Mauerziegelgewölbe

### 6.1.2.1 Voruntersuchungen

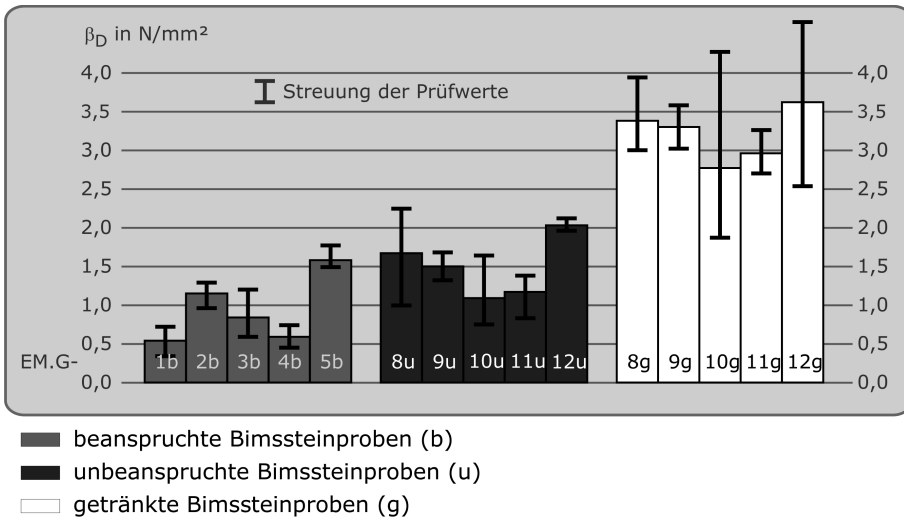
Voruntersuchungen am Gewölbemauerwerk (Mauerziegel) der Kirche St. Michael ergaben, dass in dem Mauerwerk z. T. sehr hohe Gehalte an baustoffschädlichen Salzen vorhanden sind. Nach der vorsichtigen Abnahme des Wärmedämmmörtels vom Gewölberücken wurde zudem festgestellt, dass das halbsteiige Gewölbemauerwerk schalenförmige Abblätterungen, Abmehlungen und tiefreichende, strukturverändernde Risse aufwies. Nachdem eine Studie zur Bau- und Restaurierungsgeschichte keine eindeutigen Hinweise auf äußere Einflüsse (z. B. Brand), die für die Strukturveränderungen verantwortlich gewesen sein könnten, ergeben hat, sollte im Rahmen eines Forschungsprojektes [11, 12] untersucht werden, welche Wirkung die Tränkung auf das „versalzene“ Mauerwerk hat und wie dauerhaft sie ist. Darüber hinaus sollte untersucht werden, wie sich unterschiedliche Klimabedingungen unter- (Kirchenraum) und oberhalb (Dachraum) eines Mauerziegelgewölbes auf die Feuchte- und Salzgehalte bzw. -transporte, auf die daraus resultierende beanspruchende Wirkung und damit auf die Bausubstanz selbst auswirken.

Um die Tragsicherheit des Ziegelgewölbes zu erhöhen, sollte auch das „versalzene“ Gewölbemauerwerk (Gewölbekappen) mit einem geeigneten CVS-Tränkungsmittel behandelt werden. Darüber hinaus wurde für das Gewölbe ein CVS-Gewölbe-Stütz-Putzsystem entwickelt, das auf Gewölbelaibung und -rücken aufgetragen wird. Dieses Putzsystem ist so konzipiert, dass es sowohl Lasten aus dem Gewölbe aufnehmen als auch baustoffschädliche Salze einlagern kann. Das Putzsys-

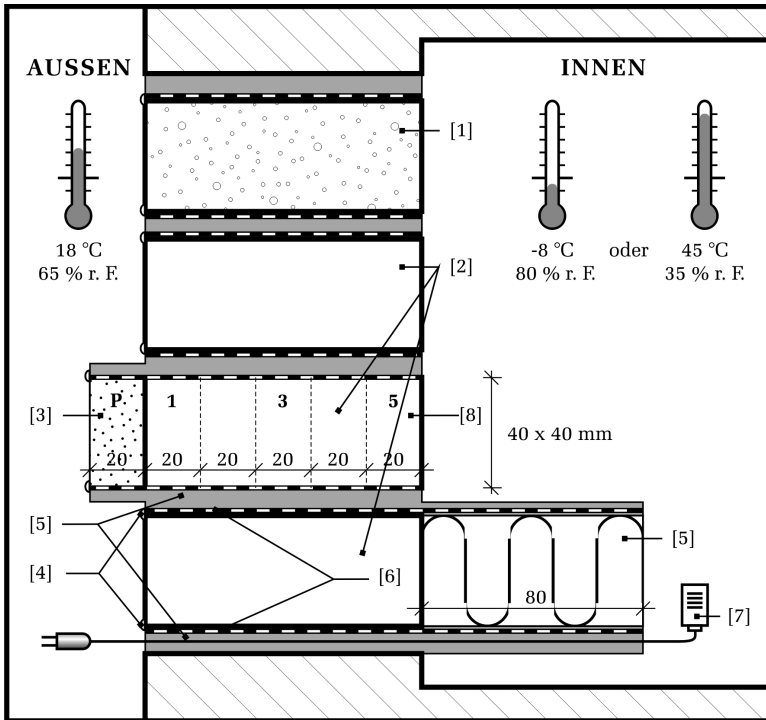
tem ist reversibel und kann gegebenenfalls teilerneuert werden. Das Putzsystem musste vom Instandsetzungsablauf und von der Applikationsfolge her so auf den Gewölberücken und die Gewölbelaibung aufgetragen werden, dass möglichst viele Salze in dieses Putzsystem eingelagert und damit das Gewölbemauerwerk entlastet wird.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens sind Mörtel-, Mauerziegel- und Bimssteinproben mit einer speziellen Salzlösung getränkt worden. Die Salzkonzentration in den Prüfkörpern ist bewusst relativ hoch eingestellt worden (s. auch Abschn. 6.1.2.3). Nach etwa zwei Jahren Lagerung sind diese Proben mit dem speziellen Tränkestoff behandelt worden. Die Mörtel-, Mauerziegel- und Bimssteinprüfkörper wurden vor und nach der Tränkung mit einer Salzlösung und dem speziellen Tränkungsmittel u. a. hinsichtlich der Druckfestigkeit untersucht. Bei den Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes kann von einer Art „Zeitraffer-effekt“ ausgegangen werden, da die Salzgehalte in den Prüfkörpern höher als im Gewölbemauerwerk waren. Im Prinzip sind die Beanspruchungen, die auf die Prüfkörper gewirkt haben, aber ähnlich denen, die im Gewölbe wirken. Somit muss davon ausgegangen werden, dass das Gewölbemauerwerk ähnlich beansprucht wurde und auch noch wird wie die Prüfkörper, nur über einen wesentlich längeren Zeitraum.

Die Auswertung der Untersuchungsergebnisse (dargestellt in Bild 14 für Bimssteinproben) zeigte, dass durch den Einsatz des speziellen Tränkungsmittels eindeutig eine Festigkeitssteigerung im salzhaltigen Baustoff (Mörtel, Mauerziegel, Bimsstein) erreicht werden kann. Ein entscheidender Einfluss von baustoffschädlichen Salzen auf die Wirkung der Tränkungsmaßnahme



**Bild 14.** Druckfestigkeit  $\beta_D$  (neu:  $f_c$ ) von beanspruchten (b), unbeanspruchten (u) und mit dem speziellen CVS-Gewölbetränkungsmittel behandelten (g) Bimssteinproben im Vergleich [11]



[1] Mörtel-Prüfkörper, [2] Mauerziegel-Prüfkörper, [3] Putzschicht, [4] Abdichtung, [5] extrudierter Polystyrolhartschaum, [6] Folie, [7] Feuchte-/Temperatur-Messgerät, [8] untersuchte Teilprüfkörper (TPK) P, 1, 3 und 5

**Bild 15.** Skizze zum Versuchsaufbau der Mauerziegel- und Mörtelprüfkörper für die Klimabedingungen 18/65 und 45/35 bzw. -8/80 im Querschnitt

ist nach den bisherigen Untersuchungsergebnissen nach fünf Jahren Lagerung nicht gegeben. Mittels der Tränkungsmaßnahme konnte demzufolge die Standsicherheit des Gewölbemauerwerks in der Kirche St. Michael gesteigert werden.

Das auf das Gewölbemauerwerk (Gewölbelaibung, Gewölberücken) aufgebrachte CVS-Gewölbe-Stütz-Putzsystem bringt eine zusätzliche Sicherheit. Die Aufgaben des CVS-Gewölbe-Stütz-Putzsystems bestehen in der Tragfähigkeitserhöhung der Gewölbekonstruktion, der Einlagerung von Salzen und damit der Konzentrations- und Beanspruchungsreduktion und im Schutz der historischen Substanz. Um den Salztransport aus dem Gewölbemauerwerk in den sichtbaren Oberputz an der Gewölbelaibung weiter zu reduzieren und die Gewölbeoberfläche länger frei von Ausblühungen zu halten, wurde der Oberputz hydrophob eingestellt. Eine Hydrophobie verhindert eine Salzdurchwanderung aber auf Dauer nicht. Das Oberputzsystem, das auf die Gewölbelaibung aufgebracht worden ist, sollte möglichst nicht mit einem Farbsystem überstrichen werden, was aber aus architektonischen Gründen verworfen worden ist. Es muss daher ein geeignetes Farbsystem ausgewählt

werden, welches das „Sicherungssystem“ nicht negativ beeinflusst. Die Einwanderung von Salzen in die Natursteinrippen des Gewölbes kann nicht wesentlich reduziert werden, sodass hier – immer in Abhängigkeit von dem Beanspruchungsgrad – möglicherweise Nacharbeiten notwendig sind.

Um die Wirkung der Salze und die Transportprozesse im Mauerziegel-Gewölbe zu untersuchen, wurde – neben der Aufzeichnung der Klimadaten im Kirchen- und Dachraum (relative Luftfeuchte und Temperatur) und groben bauphysikalischen Überschlagsberechnungen nach dem Glaser-Verfahren – ein Prüfverfahren entwickelt, um extreme Klimabedingungen ober- und unterhalb des Gewölbemauerwerks im Labor nachzustellen.

Mit der gewählten Versuchsanordnung (Bild 15) sollte untersucht werden, ob und wie bei den gewählten Klimabedingungen Feuchte- und Salztransporte in den Baustoffen (Mauerziegel und Mörtel) stattfinden. Die beiden Baustoffe (Mauerziegel, Mörtel) wurden jeweils zwei unterschiedlichen extremen Klimaten ausgesetzt, die anhand der zuvor in der Kirche durchgeführten Klimamessungen ermittelt worden waren.

### 6.1.2.2 Klimabedingungen

Die Klimabedingungen wurden mittels Trocken- und „Kühlschrank“ simuliert. Die entsprechend vorbereiteten Prüfkörper wurden in die Türöffnungen des Trocken- bzw. Kühlschranks eingebaut, sodass die eine Prüfkörperoberfläche im Laborklima mit 18 °C und 65 % r. F. (Kurzform: 18/65) lagerte. Die andere Prüfkörperoberfläche war beim Trockenschrank über eine Versuchsdauer von 90 Tagen dem Klima 45/35 und beim Kühlschrank dem Klima –8/80 ausgesetzt.

### 6.1.2.3 Baustoffe

Die Untersuchungen wurden an einer dem Gewölbemauerwerk vergleichbaren Mauerziegelart und einem Trass-Kalk-Mörtel durchgeführt.

#### Mauerziegel

Der Mauerziegel ist ein „Handverblender“ und wird zurzeit oft zur Restaurierung von historischen Bauwerken verwendet. Eine Untersuchung zur Porenradienverteilung ergab, dass der Hauptteil der zugänglichen Poren im Größenbereich der Kapillarporen liegt und mit der Porenradienverteilung der historischen Mauerziegel des untersuchten Gewölbemauerwerks vergleichbar ist [14, 15].

Die Mauerziegel wurden in Prüfkörper mit einer Größe von 40 mm × 40 mm × 100 mm geschnitten. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Prüfkörper immer aus dem Kern des Mauerziegels herausgeschnitten wurden, damit annähernd gleiche Eigenschaftsverhältnisse im Prüfkörper vorhanden sind, ohne dass z. B. eine „Sinterhaut“ des Ziegels beeinflussend wirkt. Der „Eigensalzgehalt“ wurde an mehreren Mauerziegeln ermittelt und als gering eingestuft.

Für die Versuchsdurchführung wurden die Prüfkörper bis zur Wassersättigung in einer Lösung von Natriumsulfat, -nitrat und -chlorid gelagert. Die Salzkonzentration der Lösung wurde dem WTA-Merkblatt für Sanierputze [16] entnommen, wobei der Sulfatgehalt um den Faktor 10 erhöht wurde, da der Sulfatgehalt in der WTA-Richtlinie unsererseits als zu gering eingestuft wird [17, 18]. Es ergaben sich somit folgende Salzkonzentrationen: Natriumsulfat  $\text{Na}_2\text{SO}_4 = 50 \text{ g/l}$ ; Natriumnitrat  $\text{Na}_2\text{NO}_3 = 15 \text{ g/l}$ ; Natriumchlorid  $\text{NaCl} = 35 \text{ g/l}$ . Nach der Tränkung wurden die Prüfkörper bei einem Klima 18/65 bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte mehrere Wochen gelagert. Durch die Lagerung änderte sich die Salzverteilung im Mauerziegel. Es zeigte sich, dass im Mittel die Salzgehalte in den oberflächennahen Bereichen etwa doppelt so hoch waren, wie in der Mitte des Prüfkörpers.

Zusätzlich wurden Prüfkörper ohne vorherige Lagerung in einer Salzlösung in die Untersuchungen mit eingebunden und dienten als Referenz (Nullprobe).

### Trass-Kalk-Mörtel

Als Mörtel wurde ein Trass-Kalk-Mörtel nach einer sogenannten historischen Rezeptur hergestellt, bestehend aus Sand, Trassmehl und Kalkhydrat. Der Mörtel sollte den Fugenmörtel in einem Gewölbe widerspiegeln, wobei darauf hinzuweisen ist, dass die Mörtel Eigenschaften nach [14] durch das Verbundmaterial (hier Mauerziegel), Umwelteinflüsse und Alterung deutlich verändert werden können.

Die Mörtelprismen wurden in Anlehnung an die DIN 18555 als Normprismen hergestellt. Dem Anmachwasser wurden die gleichen Salze in der gleichen Konzentration wie beim Mauerziegel zugegeben. Zusätzlich wurden Mörtel mit Wasser ohne Salzzugabe hergestellt (Nullprobe). Die Mörtelprismen wurden im Anschluss an eine 5-tägige Feuchtlagerung im Klima 18/65 bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte mehrere Wochen gelagert. Der Mörtel wies bei Beginn der Klimabelastungen einen pH-Wert  $< 9$  (durchkarbonatisiert) auf.

Die Mörtelprüfkörper wurden anschließend auf eine Größe von 40 mm × 40 mm × 100 mm trocken aus den Normprismen zugeschnitten, um identische Prüfkörperlängen wie bei den Mauerziegelprüfkörpern zu erhalten.

Auch der Trass-Kalk-Mörtel wurde vor Beginn der Klimabelastungen auf seinen Salzgehalt und die Salzverteilung hin untersucht. Es ergab sich, dass der Mörtel einen leicht erhöhten Nitratgehalt aufwies. Diese Nitratgehalte können auf natürliche „Verunreinigungen“ im Trassmehl zurückgeführt werden. Der Salzgehalt ist stichprobenartig in der Mitte und im oberflächennahen Bereich ermittelt worden. Es zeigte sich, dass kein signifikanter Unterschied in der Salzkonzentration vorlag.

### 6.1.2.4 Versuchsaufbau

Es wurden vier verschiedene Prüfkörpertypen, bestehend aus Mauerziegel- und Mörtelprüfkörpern, gewählt und untersucht (Bild 15). Um die Wirkung einer Wärmedämmung und eines Putzes auf die Feuchte- und Salzverteilung im Mauerziegel (Prüfkörperaufbau: Mauerziegel mit Wärmedämmung und Mauerziegel mit Putz) zu ermitteln, wurden zusätzlich Verbundprüfkörper hergestellt. Als 20 mm dicker Putz wurde der für den Mörtelprüfkörper verwendete Trass-Kalk-Mörtel – ohne Salzzugabe – verwendet und auf die Oberfläche des Mauerziegels aufgebracht, um die Oberfläche des Gewölbemauerwerks zum Kirchenraum zu simulieren. Als Wärmedämmung wurde eine 80 mm dicke Wärmedämmung gewählt, die auf einer Seite der Mauerziegelprüfkörper aufgebracht wurde und die Oberfläche des Gewölbemauerwerks zum Dach simulieren sollte (Bild 15).

Die Mantelflächen der einzelnen Prüfkörper wurden abgedichtet, damit ein Feuchttransport nur über die Stirnseiten gewährleistet werden konnte.

### 6.1.2.5 Versuchsdurchführung

Um festzustellen, wie sich der Salz- und Feuchtegehalt in den Versuchsmaterialien in Abhängigkeit von der Dauer der Klimabeanspruchung verhält, wurden Prüfkörper nach 7, 14, 28, 56 und 90 Tagen aus dem Versuchsaufbau entnommen. Zu jedem Prüftermin wurde eine Entnahmeeinheit von vier Prüfkörpern, von denen drei salzbelastet waren und eine ohne Salz hergestellt worden ist (Nullprobe), entnommen.

Da der Salz- und Feuchtetransport eines Prüfkörpers in Abhängigkeit vom Oberflächenabstand untersucht werden sollte, wurde der Prüfkörper in Teilprüfkörper (TPK) eingeteilt (Bild 15), von denen der erste, der dritte und der fünfte (beide Stirnseiten und Mitte) untersucht wurden – eine kleinere Einteilung des Prüfkörpers in Teilprüfkörper konnte aus finanziellen Gründen nicht erfolgen.

Nach der Entnahme wurden folgende Arbeitsschritte durchgeführt:

Visuelle Beurteilung der Prüfkörper nach dem Entfernen der Folie. Teilen (Spalten) der Prüfkörper mit einer speziellen Vorrichtung in Teilkörper (TPK). Zusätzlich Abnahme des Putzes vom Prüfkörper beim Prüfkörperaufbau Mauerziegel mit Putz.

Ermittlung des Feuchtegehalts der Teilprüfkörper. Ermittlung des Sulfat, Nitrat-, Chloridgehaltes der Teilprüfkörper.

### 6.1.2.6 Versuchsergebnisse

Die Bestimmung des Feuchtegehalts der einzelnen Teilprüfkörper erfolgte durch Ermittlung der Masse nach Entnahme und Trocknung der Teilprüfkörper bei 45 °C. Der Feuchtegehalt wurde auf die Masse der bei 45 °C getrockneten Proben bezogen.

Der Salzgehalt (Anionenkonzentration) wurde an mindestens drei Proben der Teilprüfkörper eins, drei und fünf mittels Ionenchromatographie, nach dem Aufmahlen (Korngröße < 0,125 mm) und der Elution im Ultraschallbad, bestimmt.

Die Ergebnisse der vergleichbaren Teilprüfkörper streuen bei den Mauerziegelprüfkörpern teilweise. Dies ist u. a. damit zu erklären, dass die Prüfkörper aus unterschiedlichen Mauerziegeln stammen und somit keine gleichmäßigen Eigenschaften (u. a. Porositätseigenschaft) gegeben sein können. Deshalb muss auch davon ausgegangen werden, dass unmittelbar nach der Salztränkung der Einzelprüfkörper keine gleichmäßigen Salzverteilungen in den Prüfkörpern vorhanden waren.

Die Untersuchungsergebnisse an den Mörtelteilprüfkörpern unterliegen, bis auf einzelne Ausnahmen, nicht so großen Streuungen. Dieses Ergebnis wird durch die Voruntersuchungen bestätigt; eine nahezu gleichmäßige Salzverteilung ist über die gesamte Länge der Mörtelprüfkörper gegeben.

Genauere, statistisch abgesicherte Aussagen sind dann möglich, wenn der Untersuchungsumfang deutlich erhöht wird.

### Versuchsordnung A – Sommer (Klima 18/65, Kirche und 45/35, Dach; Bild 16)

Das Klima im Trockenschrank sollte im Mittel bei 45/35 liegen. Innerhalb des Prüfzeitraums von 90 Tagen sank die relative Feuchte von 45 % auf 30 % r. F. ab. Im Prüfalter von 28 und von 79 Tagen sank für jeweils etwa fünf Tage die relative Feuchte auf 15 % r. F. ab. Die erste Absenkung ist am Feuchtegehalt der Teilprüfkörper deutlich erkennbar, wogegen sich die zweite Absenkung nicht signifikant auf den Feuchtegehalt der Prüfkörper auswirkte.

Die Ergebnisse der Feuchtegehaltsuntersuchungen zeigen, dass die salzhaltigen Prüfkörper einen wesentlich höheren Feuchtegehalt aufweisen als die Nullproben, was u. a. auf die Hygroskopizität der Salze zurückzuführen ist.

#### *Mörtel und Mauerziegel*

Die Mörtelprüfkörper weisen im Gegensatz zu den Mauerziegelprüfkörpern einen hohen Anfangsfeuchtegehalt auf, der mit zunehmender Lagerungsdauer zu einem nahezu gleichmäßigen „Ausgleichsfeuchtegehalt“ abnimmt. Der mit der oberflächennahen Trocknung verbundene Feuchtetransport hat im Prüfzeitraum beim Mörtel offenbar keinen wesentlichen Einfluss auf den Salztransport zur Folge. Die ermittelten Salzgehalte sind über die Prüfkörperlänge nahezu konstant. Im Mauerziegelprüfkörper sind ebenfalls keine wesentlichen Veränderungen des Salzgehalts, in Abhängigkeit von der Prüfdauer, erkennbar.

#### *Mauerziegel mit Wärmedämmung*

Die bauphysikalischen Überschlagsberechnungen nach dem Glaser-Verfahren haben für den vorgegebenen Prüfkörperaufbau für den salzfreien Baustoff ergeben, dass sich zwischen Wärmedämmung und Mauerziegel Tauwasser bildet.

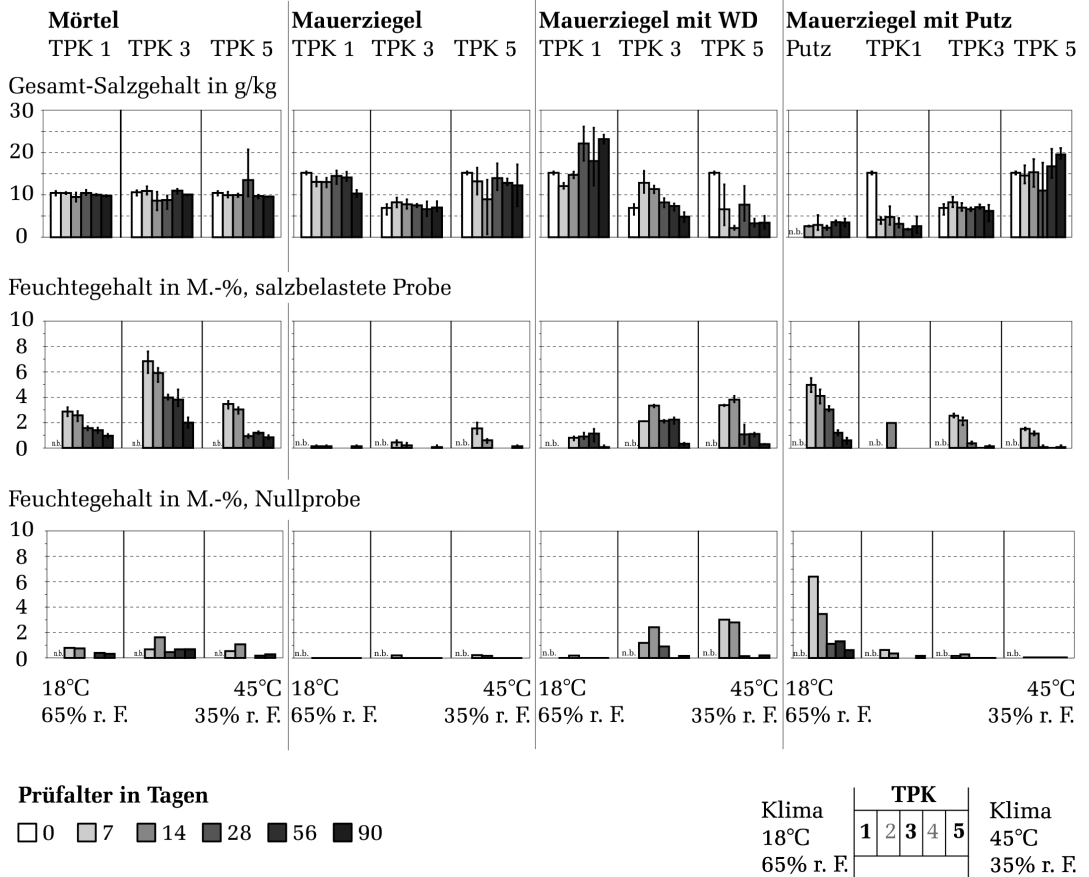
Die Untersuchungen zeigen, dass bei den salzbelasteten und den salzfreien Prüfkörpern im Mauerziegel Tauwasser anfällt und ein Salztransport von der wärmeren (TPK 5) zur kühleren (TPK 1) Seite stattfindet. Für ein mit einem Wärmedämmputz versehenes Gewölbemauerwerk würde dies bedeuten, dass insbesondere im Sommer eine Salzanreicherung an der Gewölbelaibung (Kirchenraum) stattfindet.

#### *Mauerziegel mit Putz*

Der Putz wurde praxisgerecht auf die Mauerziegelprüfkörper aufgetragen. Entsprechend ist in den Mauerziegeln (Putzgrund) ein hoher Anfangsfeuchtegehalt aufgrund des Eintrags von Anmachwasser festzustellen.

Unter anderem führt dieser Feuchteeintrag offenbar dazu, dass Salze in Richtung der wärmeren Seite mit einem geringeren Luftfeuchtegehalt transportiert werden. Ob dies auf einen Kapillartransport allein oder auch auf einen Oberflächendiffusionstransport [10] zurückzuführen ist, müsste noch genau untersucht werden.





[ : Streubereich; WD: Wärmedämmung; TPK: Teilprobekörper, n. b.: nicht bestimmt

**Bild 16.** Ergebnisdarstellung für die Versuchsanordnung A im Überblick (Feuchtegehalt in M.-%, Salzgehalt in g/kg) aufgetragen über die Zeit für das Klima 18/65 und 45/35

Für den Auftrag von feuchten Kompressen zur Salzreduktion auf ein Bauteil bedeutet dies, dass im Bauteil vorhandene Salze durch feuchte Kompressen zuerst in das Bauteil transportiert werden und somit eine unmittelbare, salzreduzierende Wirkung einer solchen Komresse unmittelbar nach dem Auftrag kaum gegeben ist.

**Versuchsanordnung B – Winter**  
(Klima 18/65, Kirche und –8/80, Dach; Bild 17)

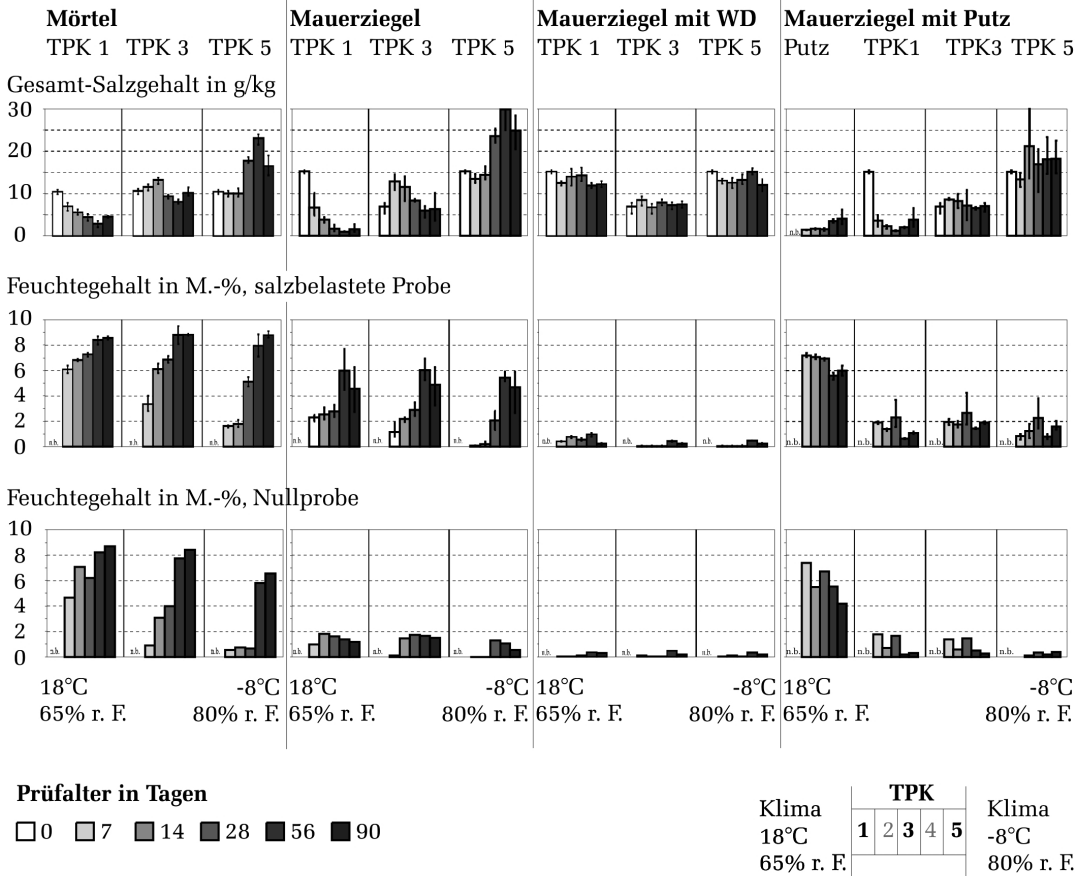
Das Klima im Kühlschrank lag bei –8/80 (Dachraum), dem das Laborklima (Kirchenraum) von 18/65 gegenüber stand. Während der Versuchsdauer stiegen Temperatur und relative Feuchte in dem Kühlschrank geringfügig an.

**Mörtel und Mauerziegel**

Die bauphysikalischen Überslagsberechnungen haben ergeben, dass sich unter den genannten Klimabe-

dingungen an der wärmeren Seite der Prüfkörper Tauwasser bildet.

Im Prüfkörper Mörtel und im Prüfkörper Mauerziegel ist ein Salztransport von der wärmeren zur kühleren Seite erkennbar. Die Feuchtegehalte stiegen von der wärmeren Seite beginnend zur kühleren Seite hin ständig an; nach einer Versuchsdauer von 90 Tagen sind die Prüfkörper z. T. stark durchfeuchtet. Die Mörtelprüfkörper, die am 56. bzw. am 90. Prüftag entnommen wurden, zeigten zur kälteren Seite oberflächlich eine Eiskristallbildung und nach Trocknung starke Ausblühungen und Verfärbungen. Der Mörtel war, wie am Gewölbe der Kirche in Elsdorf-Berrendorf auch, in seinem Gefüge zerstört. Beim Mauerziegel hingegen ist keine Eiskristallbildung sichtbar, aber an der kälteren Seite sind starke Ausblühungen zu erkennen. Nach 90 Tagen Lagerung ist in beiden Prüfkörperarten eine Abnahme der Salzkonzentration an der kälteren Seite festzustellen. Offensichtlich werden die Salze durch die eintre-



**Bild 17.** Ergebnisdarstellung für die Versuchsanordnung B im Überblick (Feuchtegehalt in M.-%, Salzgehalt in g/kg) aufgetragen über die Zeit für das Klima 18/65 und -8/80

tende Eisbildung in den Prüfkörper „zurückgedrängt“; weiterführende Untersuchungen sind notwendig.

**Mauerziegel mit Wärmedämmung**

Im Prüfzeitraum hat kein erkennbarer wesentlicher Salztransport in den wärmegeprägten Mauerziegeln stattgefunden. Der Feuchtegehalt in den Prüfkörpern ist gering und weist ebenfalls keine wesentliche Änderung auf.

**Mauerziegel mit Putz**

Der Feuchtegehalt des Putzmörtels nimmt in der Nullprobe (salzfreier Prüfkörper) aufgrund des Umgebungs-klimas (Kühlschrank) deutlich langsamer ab als in der Versuchsanordnung A. Zu dem nach 90 Tagen immer noch hohen Feuchtegehalt im Putz trägt die Oberflächentauwasserbildung (TPK 1) bei. Der Salzgehalt im Putz nimmt mit zunehmendem Prüfalter langsam zu; in der Mauerziegelteilprobe TPK 5 ist

keine wesentliche Änderung ab einem Prüfalter von 28 Tagen feststellbar. Das Anmachwasser des Putzes hat offenbar auch bei diesen Versuchsparametern zu einem anfänglichen Salztransport Richtung TPK 5 geführt. In dem Mauerziegel selbst bleibt, im Gegensatz zur Nullprobe, ein erhöhter Feuchtegehalt über die Prüfkörperlänge erhalten, der auf die Hygroskopizität der Salze zurückzuführen ist.

**6.1.2.7 Übertragen der Ergebnisse auf das Gewölbemauerwerk**

Im Folgenden werden die verschiedenen Prüfkörperaufbauten in Zusammenhang mit den unterschiedlichen Klimabedingungen gemäß der Versuchsanordnung A und B beschrieben und bewertet. Die Ergebnisse werden auf das Gewölbemauerwerk übertragen und mögliche Folgen werden erläutert.

## Prüfkörperaufbau Mörtel und Mauerziegel

Da sich der Feuchte- und Salztransport in beiden Prüfkörperarten ähnlich verhalten hat, wurden nachfolgend die Ergebnisse zusammen beurteilt.

Die Untersuchungen ergaben, dass in den Prüfkörpern im Versuchsaufbau A (Trockenschrank) trotz hoher Feuchtegehalte im Mörtel kein Salztransport stattfindet (Lage der Verdunstungs- bzw. der Kondensationszone innerhalb des Mörtelprüfkörpers). Auch im Mauerziegel finden keine Salztransporte statt, was u. a. auf den niedrigen Feuchtegehalt zurückzuführen ist. Im Gegensatz dazu sind die Prüfkörper im Versuchsaufbau B (Kühlschrank) z. T. stark durchfeuchtet und es hat ein Salztransport von der wärmeren zur kälteren Seite stattgefunden. Es hat also ein Kapillartransport stattgefunden. Überträgt man die Ergebnisse auf Gewölbemauerwerk ohne Wärmedämmung, so wird dieses im Winter stark durchfeuchtet und es findet ein großer Salztransport von der Gewölbelaibung in Richtung Gewölberücken statt, d. h. von der wärmeren zur kühleren Seite. Im Sommer kommt der Salztransport zur Ruhe und das Mauerwerk ist nur noch mäßig durchfeuchtet. Das Wechselklima führt zwangsläufig neben der Mobilisierung der Salze zu Kristallisations- und Hydratationsprozessen. Diese Prozesse und damit die Schädigung führen zu einer Beanspruchung des Gewölbemauerwerks an der Oberseite.

Frost-Tau-Wechsel führen aufgrund der hohen Feuchtegehalte im Mörtel zu einer zusätzlichen Beanspruchung. Im Versuch wurde an der Mauerziegeloberfläche zur kälteren Seite im Vergleich zum Mörtel zwar visuell keine Eisbildung festgestellt, es ist aber davon auszugehen, dass auch hier eine Eisbildung stattfindet und mit zu einer Beanspruchung der Gewölbematerialien beiträgt. Mauerziegel haben erfahrungsgemäß, das zeigen auch die Untersuchungen, einen höheren Widerstand gegen schadsalzbedingte Beanspruchungen und Gefrierbeanspruchungen als Mörtel. Der Mörtel transportiert offenbar mehr Salz und Feuchte als der Mauerziegel und wird daher stärker beansprucht.

### Prüfkörperaufbau Mauerziegel mit Wärmedämmung

Im Vergleich zu den Prüfkörperaufbauten Mörtel und Mauerziegel finden im Prüfkörperaufbau Mauerziegel mit Wärmedämmung genau entgegengesetzte Prozesse statt. Hier ist im Versuchsaufbau B (Kühlschrank) kein Salztransport festzustellen, wobei im Versuchsaufbau A (Trockenschrank) große Salztransporte von der wärmeren zur kühleren Seite stattfinden.

Der Auftrag des Wärmedämmmörtels hat also an dem historischen Gewölbe dazu geführt, dass die Salze Richtung Kirchenraum transportiert worden sind. Aus diesem Grunde sind jetzt die Salzausblühungen an der Gewölbelaibung verstärkt sichtbar. Deshalb wurde in der Kirche St. Michael ein spezielles Putzsystem entwickelt.

### Prüfkörperaufbau Mauerziegel mit Putz

Der Putzauftrag auf die Gewölbelaibung führt im Sommer unter den Prüfbedingungen als auch im Winter dazu, dass die Salze zumindest anfänglich Richtung Gewölberücken (Dachraum) transportiert werden. Anhand der Untersuchungen zum Winterklima zeigt sich, dass nach dem Putzauftrag nach einer bestimmten Zeit sich offenbar ein Salzkonzentrationsausgleich zwischen Mauerziegel und Putz einstellt, da der Salzgehalt im Putz etwas ansteigt. Langfristig muss davon ausgegangen werden, dass sich in dem Verbundsystem Mauerziegel mit Putz die gleichen Verhältnisse einstellen wie bei den Prüfkörpern Mörtel und Mauerziegel. Für das Gewölbe bedeutet dies, dass sich unmittelbar nach einer Putzinzustandsetzung mit herkömmlichen Mörteln zunächst ein optisch besserer Zustand zeigt, der nach mehreren Jahren wieder in Absanden und Ausblühen des Putzes übergeht.

## 6.1.2.8 Maßnahmen zur Reduzierung der Beanspruchung im Gewölbemauerwerk

Unterschiedliche klimatische Verhältnisse führen, wie zu erwarten, zu unterschiedlichen Feuchte- und Salztransporten. Deshalb musste es ein Ziel sein, durch geeignete Maßnahmen die Klimaverhältnisse ober- und unterhalb des Gewölbes einander anzugleichen.

In der Vergangenheit ging man davon aus, dass dies durch eine Wärmedämmung auf dem Gewölbe erreicht wird, sodass im Gewölbemauerwerksquerschnitt eine nahezu konstante Temperatur herrscht. Schon überschlägige Berechnungen nach *Glaser* zeigen, dass unter bestimmten Klimabedingungen (hohe Temperaturen und Luftfeuchten) Tauwasser in der Zone Wärmedämmung/Gewölbemauerwerk anfällt, was durch die Untersuchungen bestätigt wird. Dieses Tauwasser beansprucht die Bausubstanz. Während dies für einen Neubau in bestimmten Grenzen toleriert werden kann, sollte es bei einem salzbelasteten historischen Gewölbe, aber auch bei einem Gewölbe aus „Kalk-Bimssteinen“, vermieden werden.

Die Untersuchungen zeigen zudem, dass durch die Tauwasserbildung eine extreme Feuchteanreicherung erfolgen kann und schädliche Salze mobilisiert werden, die zu einer weiteren extremen Beanspruchung des Gewölbemauerwerks führen kann.

Ziel einer jeden Instandsetzung muss es sein, die historische Substanz soweit wie möglich zu erhalten. Bei dem Gewölbe der Kirche St. Michael in Elsdorf-Berrendorf musste die Tragsicherheit des Gewölbes wesentlich erhöht und die bauphysikalisch und chemisch bedingten Beanspruchungsprozesse mussten durch geeignete Maßnahmen deutlich reduziert werden, um die Dauerhaftigkeit dieser Maßnahme zu gewährleisten.

Um die bauphysikalischen Prozesse im Mauerwerk zu reduzieren, war es deshalb ein Ziel, die Klimaverhältnisse anzupassen und ein möglichst gleichmäßiges Klima so zu erreichen, dass die salz- und feuchtebedingten Beanspruchungsprozesse oberhalb des Gewölbes mög-

licht dem Klima unterhalb entsprechen. Zudem wurde ein Putzsystem entwickelt und aufgetragen, das neben seiner tragenden Funktion auch zu einer Salzreduktion im historischen Gewölbe beiträgt.

Um die Klimabedingungen oberhalb des Gewölbes an die Verhältnisse unterhalb anzugleichen, sollte deshalb im Dachraum ein Luftraum zwischen dem Gewölbe und einer Wärmedämmung angeordnet werden. Dieser Luftzwischenraum wurde durch Öffnungen im Gewölbe mit dem Kirchenraum so verbunden, dass ein ständiger Temperatur- und Luftfeuchteausgleich zwischen Kirchen- und Luftraum stattfindet. Das Klima in der Kirche wird mithilfe einer „intelligenten Lüftung“ bei der über ein klimagesteuertes Lüftungs- und Heizsystem ein möglichst für die Bausubstanz verträgliches Klima erzielt wird, geregelt. Entsprechende Versuche während der Instandsetzungszeit der Gewölbe zeigten einen deutlichen Erfolg dieser Maßnahme.

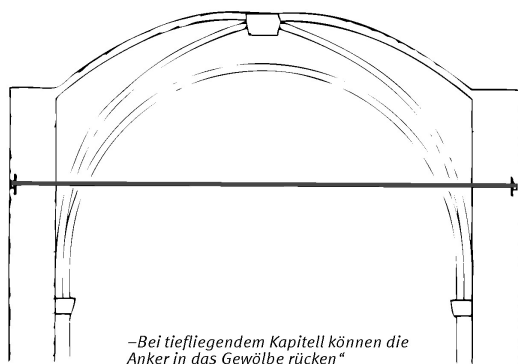
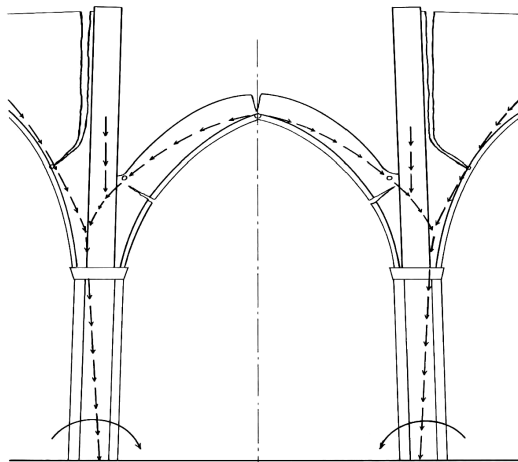
## 6.2 Spannkraftregulierung an Spannankern zur gleichmäßigen Gewölbeschubaufnahme – Maßnahme 2<sup>3)</sup>

Die Sicherung der Gewölbe in der Kirche St. Michael machte den nachträglichen Einbau von Zugstangen zur Aufnahme der Schubspannungen im Gewölbeanfängerbereich notwendig (Bild 18). An vielen Kirchen werden die Anker eingebaut, ohne die Spannungen, die in den Anker real gegeben sind, beim Anspannen oder auch im späteren Bau- (z. B. Instandsetzungsmaßnahme) bzw. Nutzungszustand zu überprüfen.

Die vom Tragwerksplaner vorgegebenen Vorspannkraft der Anker werden in der Regel mittels eines Drehmomentenschlüssels über Ankopplungsplatten ins historische Mauerwerk eingetragen.

Die eigenen Untersuchungen mittels Formänderungsmessungen an den Spannankern haben gezeigt, dass das Aufbringen der Vorspannkraft mittels Drehmomentenschlüssel mit sehr großen Unsicherheiten verbunden ist und nur bei Einsatz einer speziellen Technik angewendet werden sollte.

Unter anderem aufgrund der Aussagen von Herrn Dipl.-Ing. Finck vom Büro Finck-Billen in Köln und von Herrn Dipl.-Ing. Krings vom Büro Krings in Rös-rath, dass sie schon viele Spannanker gesehen haben, die offenbar nach einer gewissen Standzeit keine Spannkraft mehr aufweisen, und um äußere Einflüsse auf das Gewölbe (z. B. aus Gebäudesetzungen) erfassen zu können, wurde beschlossen, den Spannungsaufbau während des Anspannens und die Spannungsänderungen in den Anker über einen gewissen Zeitraum messtechnisch zu verfolgen. Dazu sind auf die Ankerstangen Dehnungsmessstreifen (DMS) appliziert worden (Bild 19).



**Bild 18.** Auftretender Gewölbeschub (oben) und Zuganker, eingezogen in Höhe der Gewölbeanfänger (unten)

### 6.2.1 Randbedingungen

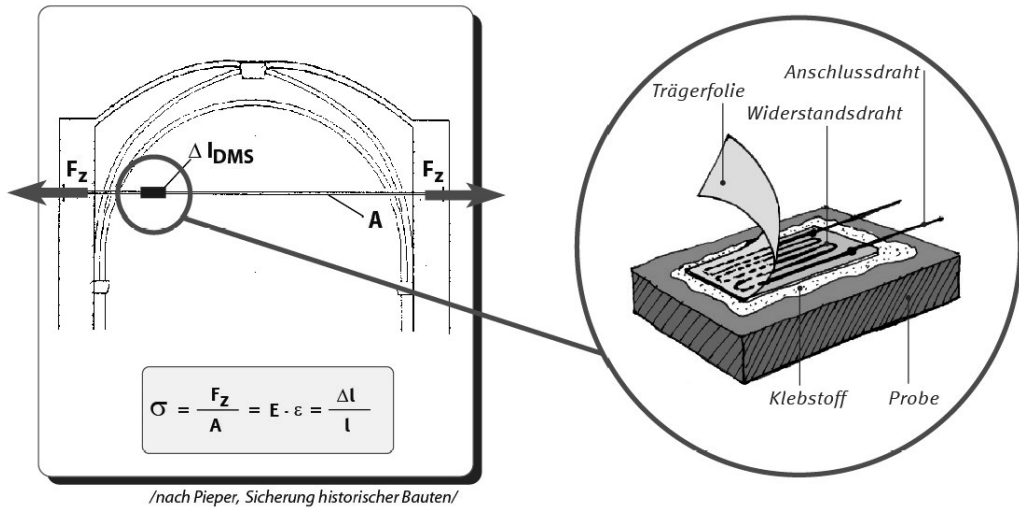
#### 6.2.1.1 Bauzustand

Die Zugstangen sind unmittelbar nach der Abstützung der Gewölbe mit speziellen Lehrbögen und der ersten Maßnahme zur Tragfähigkeitserhöhung der Gewölbeanfänger und der Pfeiler eingebaut worden (s. auch [21]). Alle anschließenden Gewölbeinstandsetzungsmaßnahmen, die u. a. auch mit Lastumlagerungen im Gewölbe selbst einhergehen, wurden erfasst.

#### 6.2.1.2 Klimabedingungen

Kurz nach Beginn der ersten Instandsetzungsmaßnahme in der Kirche (Auftrag eines Sockelunterputzes), stieg die Luftfeuchte in der Kirche so weit an, dass – wie bereits am Umgang der Kirche St. Ursula in Köln 2000 geplant – eine „intelligente Lüftung“ (keine Klimaanlage) angeordnet wurde [22]. Die zuständige Heizungs-firma [23] wurde gebeten, ähnlich der Planung am Lüftungsumgang der Kirche St. Ursula in Köln [24] eine

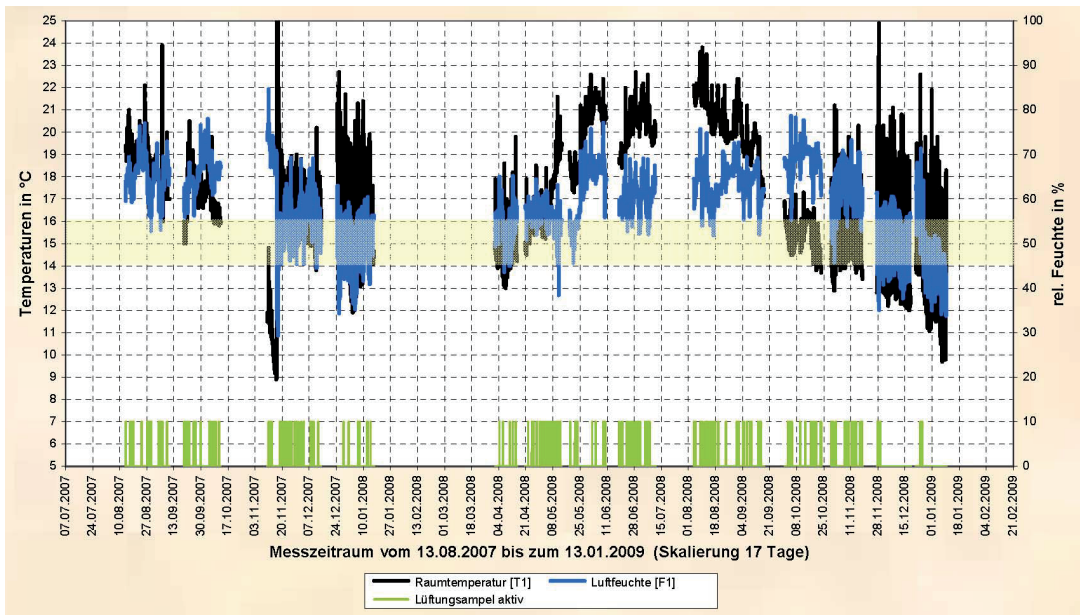
3) Mitautoren: S. Desoi und M. Engels, Kalbach; D. Schäfer, Reichshof-Wehrath



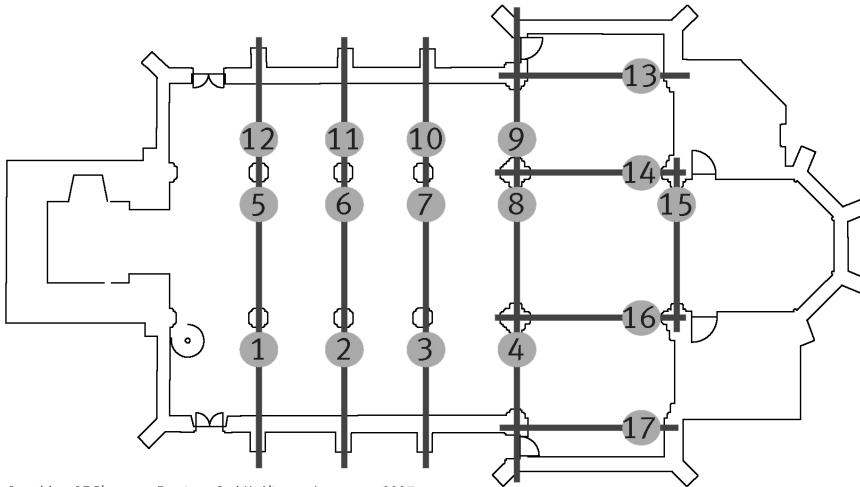
**Bild 19.** Auffangen von Gewölbeschub mittels Edelstahlanker – Erfassen von Zugspannungen im Edelstahlanker mittels DMS

Steuerung so zu konzipieren, dass die Außenluft nur dann zur Belüftung des Kirchenraumes eingelassen wird, wenn die Luftfeuchte, entsprechend abgestimmt auf das Innenraumklima, für die Bausubstanz akzeptabel ist. Dazu wurde das Klima (Temperatur, relative Luftfeuchte) außerhalb und innerhalb der Kirche kontinuierlich durch jeweils einen Messfühler außen und innen erfasst. Zusätzlich wurden zwei Luftentfeuchter aufgestellt, die

im Kircheninnenraum evtl. auftretende „Feuchtespitzen“ reduzieren bzw. „aufnehmen“ sollten. Diese Art der Klimatisierung funktioniert im Sommer ohne Zuschaltung einer Heizungsanlage, benötigt nur sehr wenig Energie und wirkt, wie die Messungen ergeben haben, äußerst schonend auf die historische Substanz und ist mit keinem großen finanziellen Aufwand verbunden.



**Bild 20.** Aufzeichnen der Klimadaten [23] innen durch Messfühler der „Lüftungssampel“ für den Zeitraum vom 13.08.2007 bis zum 13.01.2009 (Messlücke vom 15.12. bis 23.12.2007)



Grundriss: OE Planung + Beratung GmbH, Altena – Laserscan, 2007

**Bild 21.** Lage der Ankerstangen und Kennzeichnung der Messstellen

Auszüge der Klimadaten vom Innenraum und der Außenluft sind in Bild 20 dargestellt. In der Kirche konnte die Luftfeuchte durch diese Art der Lüftung von Spitzenwerten um 80% r. F. auf eine relative Luftfeuchte von im Mittel etwa 55% r. F., kurzzeitig bis maximal 70% r. F., gesenkt werden.

## 6.2.2 Prüfeinrichtungen

Zur Messung der Zugspannungen in den Zugankern, die in der Kirche St. Michael in Höhe der Gewölbeanfänger nachträglich eingebaut worden sind, wurden spezielle Dehnungsmessstreifen appliziert. Die Dehnungsmessstreifen sind in der Nähe der Gewölbeanfänger appli-

ziert worden und verblieben für die Dauer der Bauzeit auf den Ankern (s. auch Bild 19 und 21).

Die DMS waren über Messkabel, die entlang der Edelstahlstangen in die Gewölbeanfänger und dann über den Dachraum bis in die Sakristei verlegt worden sind, an die Messvorrichtung angeschlossen. Die Daten (Spannungsverläufe bzw. -änderungen) konnten so kontinuierlich mit entsprechender Messtechnik erfasst werden. Nach Rücksprache mit der Firma, die die DMS vertreibt, ist ein spezieller DMS ausgewählt worden, mit dem die reine Längenänderung der Ankerstangen erfasst werden konnte.

## 6.2.3 Spannanker

### 6.2.3.1 Lage und Eigenschaften

Die Lage der Anker ist in Bild 21 dargestellt. Die wesentlichen Eigenschaften der Spannanker sind in Tabelle 1 angegeben.

### 6.2.3.2 Einbau

Aufgrund des geplanten Messzeitraums von mehreren Jahren und um die Lasteinleitung in die historische Konstruktion so schonend wie möglich vorzunehmen, wurde die Mehrzahl der Spannanker einseitig im Kirchenschiff, ohne Kopfplatte mit einem speziellen mineralischen CVS-Verbundmörtel [25] im kraftschlüssigen Verbund zum Mauerwerk eingesetzt.

Auf der gegenüberliegenden Seite des Spannankers (meist am Außenstrebpfeiler) erfolgte die Lasteinleitung über normalerweise verwendete Kopfplatten, was sich später aufgrund der durchgeführten Messungen als alleinige Ankopplung als nicht sinnvoll herausstellte. Im Chorbereich der Kirche mussten die Anker zweiseitig im Verbund zum Mauerwerk eingesetzt werden. Die

**Tabelle 1.** Spannankereigenschaften

Eigenschaften	Einheit	Werte
Durchmesser	mm	36
Kerndurchmesser	mm	30
Streckgrenze	N/mm <sup>2</sup>	240
Zugfestigkeit	N/mm <sup>2</sup>	540 bis 690
Rohdichte	kg/dm <sup>3</sup>	8,00
E-Modul bei +20 °C	N/mm <sup>2</sup>	200.000
Wärmeausdehnung	1/K	$16,5 \times 10^{-6}$
Wärmeleitfähigkeit	W/(m · K)	15,0
spezifische Wärmekapazität	J/(kg · K)	500
elektrischer Widerstand	Ω	0,75
magnetisierbar	–	nein

Vorspannung der Anker konnte über eine spezielle und nicht sichtbare Spannvorrichtung erfolgen.

Um den genauen Zusammenhang zwischen den speziellen Ankern und der durch DMS gemessenen Dehnungen zu erhalten, wurden im Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) entsprechende Zugversuche zum Kalibrieren der Ankerstangen und der DMS durchgeführt.

### 6.2.3.3 Erster Anspannvorgang

Nachdem die DMS auf den Zugstangen appliziert und die Messeinrichtung in Betrieb genommen worden war, wurde – wie vom Tragwerksplaner angegeben – in einem ersten Arbeitsgang das Anspannen der Zugstangen mit einem Drehmomentschlüssel durchgeführt. Es sollte eine Vorspannkraft von 30 kN aufgebracht werden.

Obwohl bei dem ersten Anspannen der Anker die Spannkraft gemäß Drehmomentschlüssel längst hätte erreicht sein müssen, konnte mittels DMS bei den meisten Ankern keine entsprechende Dehnung bzw. Spannkraft an den Ankern festgestellt werden. Auch nach einer Erhöhung des Drehmoments konnte bei einigen Ankern keine entsprechende Dehnung gemessen werden. Die Anspannung der Anker mittels Drehmomentschlüssel wurde daraufhin nicht weiter fortgesetzt und sollte zukünftig ohne eine genaue Messeinrichtung abgelehnt werden.

### 6.2.3.4 Zweiter und dritter Anspannvorgang

Der zweite Anspannvorgang wurde mit einem Ausziehprüfgerät durchgeführt. Mittels dieses Geräts konnte eine äußere Spannkraft und zugehörige Formänderung am Lasteinleitungspunkt am Zugstangenende ermittelt werden. Die mittels des Prüfgerätes festgestellte Formänderung konnte mit der an der DMS gemessenen Formänderung verglichen werden.

Es zeigte sich, dass trotz einer vorherigen Mauerwerkertüchtigung die Formänderungen an den Lasteinleitungspunkten (Kopfplatten der Zugstangen) im Verhältnis zu den Formänderungen der Zugstange sehr groß waren. Bei einer Vorspannlast der Anker von 30 kN wurden z. B. Formänderungen an einigen Kopfplatten von  $\Delta l > 5$  mm gemessen, während am Anker selber nur absolute Formänderungen von  $\Delta l \ll 1$  mm gemessen worden sind.

Nach etwa 19 Monaten sind die Anker erneut mit dem Ausziehprüfgerät bis auf die vom Tragwerksplaner vorgegebene Last von 30 kN nachgespannt worden, nachdem über diesen Zeitraum nach dem zweiten Anspannvorgang die Spannung in den Ankern wieder z. T. extrem abgenommen hatte. Auch nach einem dritten Anspannvorgang konnte innerhalb kurzer Zeit wieder z. T. ein deutlicher Spannkraftverlust festgestellt werden (s. Bild 23).

### 6.2.4 Messergebnisse

Nachdem die Gewölbe durch Lehrbögen abgestützt und die Spannanker eingebaut worden waren, wurden die Gewölbe mittels der zuvor beschriebenen Verfahren er-

tüchtigt (s. auch [21]). Anschließend sind bewehrte Oberlastrippen aus einem Leichtmörtel oberhalb der z. T. bestehenden Gewölberippen aufgebracht worden. In Bild 22 ist zu erkennen, dass der Oberlastrippenauftrag auf die ersten drei Gewölbefelder in den südlichen Seitenschiffankern (SS) zu einer deutlichen Laststeigerung um bis zu 20 % (etwa 6 kN) führt. Der Gewölbeschub wurde also anfänglich deutlich erhöht. Auch die Zugstangen im Hauptschiff (HS), die in der Verlängerung der Seitenschiffanker liegen, erfahren eine Krafterhöhung – wenn auch geringer – von bis zu 3 kN. Mit der Erhärtung des Oberlastrippenmörtels nahm auch die Spannung in den Zugstangen etwa innerhalb eines Tages wieder so weit ab, dass annähernd der Spannungszustand vor dem Oberlastrippenauftrag erreicht wurde. Das Ausschalen der Oberlastrippen nach zwei Tagen Standzeit führte zu keiner wesentlichen Formänderung an den Zugstangen des Seitenschiffs.

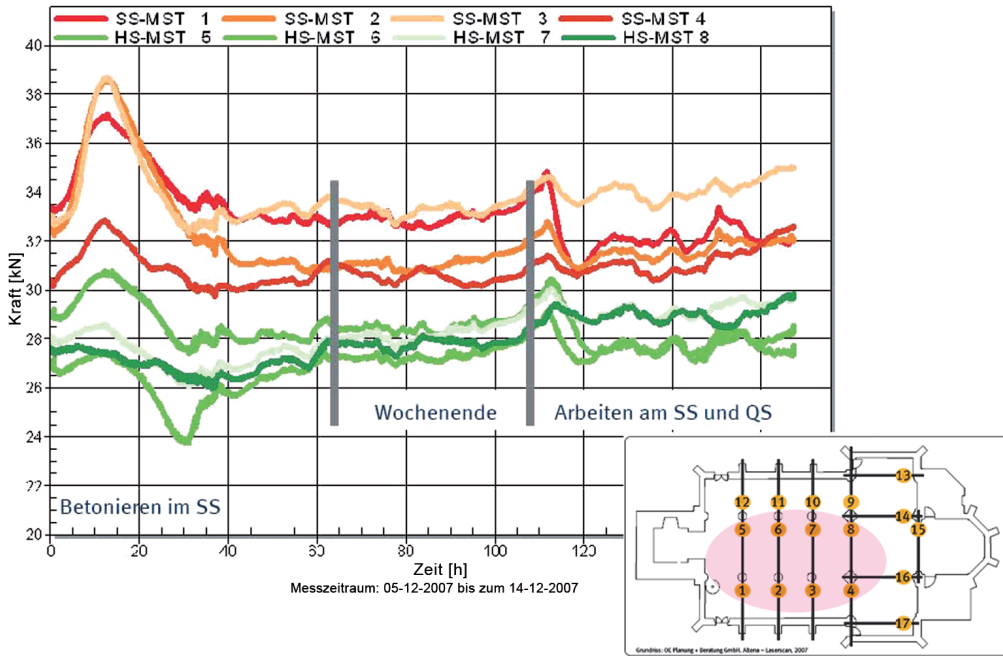
Nachdem die Oberlastrippen im Seitenschiff fertig gestellt worden sind, steigt in nahezu allen Ankern die Spannung wieder an. In dieser Zeit (08.12.2007 bis 24.12.2007) fallen die mittleren Außentemperaturen von etwa +13 °C bis auf den Gefrierpunkt ab. Die mittleren Innentemperaturen bleiben in dieser Zeit nahezu konstant bei im Mittel etwa +15 °C. Der Gewölberücken mit den Oberlastrippen und die Außenflächen der Außenwände kühlen ab, während die Gewölbelaibung und die Innenwandflächen eine Temperatur von etwa +15 °C aufweisen. Zum Teil extreme Schwankungen zwischen Tages- und Nachttemperaturen während der Weihnachtszeit führen in den Ankern zu Spannungswechseln, die bis zu etwa 3 kN je etwa 24 h betragen können.

Im Frühjahr 2009 sind alle Anker noch einmal bis auf 30 kN angespannt worden. In Bild 23 ist zu erkennen, dass unmittelbar nach dem Anspannen zunächst ein Spannungszuwachs für etwa 10 Tage gegeben ist, bevor dann wieder ein deutlicher Spannungsabfall, der wie gewohnt im Chor (MST 15) am größten ist, eintritt. In dieser Zeit sind keine wesentlichen Arbeiten am Gewölbe durchgeführt worden, sondern nur solche zur konstruktiven Sicherung des Dachstuhls und des Fassadenmauerwerks. Somit ist zu vermuten, dass der Spannungsabfall für den in Bild 23 dargestellten Zeitraum insbesondere aus Formänderungen von Mauerwerk (Kriechen) und Stahl (Relaxation) sowie temperaturbedingten Formänderungen herrührt.

### 6.2.5 Beurteilung

Erste Erklärungsansätze für die Zugkraft- bzw. Spannungsänderungen in den Ankern sind Temperaturdifferenzen im Bauwerk, aber auch in der Gewölbekonstruktion selbst.

Die sehr großen Formänderungen während des Anspannvorgangs an den Kopfplatten geben einen ersten Hinweis darauf, dass die Spannung und damit die Zugkraft im Anker durch eine relative große Kriechverformung des Mauerwerks sehr schnell abgebaut werden kann.

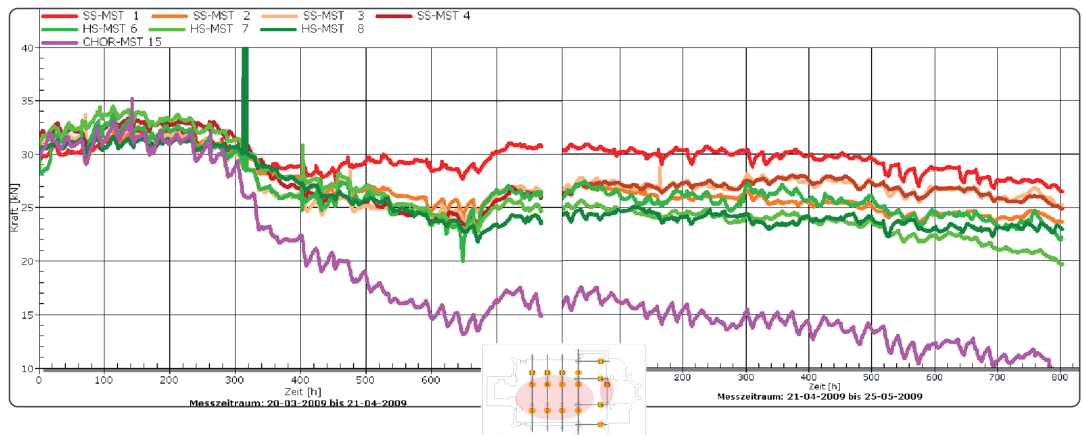


**Bild 22.** Ankerkraft in kN, aufgetragen über die Zeit in h für den Messzeitraum vom 05.12.2007 bis 14.12.2007

SS: südliches Seitenschiff

HS: Hauptschiff

MST: Messstelle



**Bild 23.** Ankerkraft in kN aufgetragen über die Zeit in h für den Messzeitraum vom 20.03.2009 bis 25.05.2009

SS: südliches Seitenschiff

HS: Hauptschiff

MST: Messstelle



Die andauernde dynamische Beanspruchung, z. B. aus Temperaturänderung, begünstigt die Kriechverformungen und damit den Spannungsabbau.

Neben den Bauzuständen und den Formänderungen des Gebäudes hat offensichtlich insbesondere die Außentemperatur einen deutlichen Einfluss auf die wirkende Ankerspannung.

Die Oberlastrippen ziehen sich insbesondere am Gewölberücken (Oberlastrippen) infolge der Austrocknung und Abkühlung zusammen, was anfänglich zu einer den Oberlastbogen aufweitenden Formänderung führt; in den Zugstangen entsteht eine zusätzliche Zugkraft.

### 6.2.6 Einbau von Spannkraftreglern

Um die vorhandenen Spannungsschwankungen zu reduzieren, ist eine Spannkraftregulierung konstruiert worden, die es ermöglicht, die Spannkraft in den Zugankern oder auch in Druckstützen möglichst konstant zu halten und somit sowohl Spannungsverluste als auch Spannungsspitzen (z. B. aus kleineren Erdbebenbeanspruchungen und sonstigen dynamischen Beanspruchungen) zu kompensieren.

In Kooperation mit der Firma Desoi in Kalbach/Rhön [30] wurde daher der sogenannte Spannkraftregler (SKR) entwickelt, der es ermöglicht, die Spannung an den Zugankern dauerhaft auf einem vom Tragwerksplaner vorgegebenen Lastniveau zu halten. Zwei dieser neu entwickelten Spannkraftregler aus Edelstahl sind in Abstimmung mit den an der Instandsetzung Beteiligten von einschlägigen Fachfirmen in die Kirche eingebaut und die Wirkung mittels der entsprechenden Messtechnik gemessen worden (Bilder 24 und 25).

Der Spannkraftregler hat die Aufgabe, den vom Tragwerksplaner vorgegebenen Spannungszustand möglichst auf einem gleichmäßigen Niveau dauerhaft, auch bei dynamischen Beanspruchungen (z. B. Erdbeben geringer Stärke, Glockengeläut, Temperatur- und Feuchtwechsel), möglichst gleichmäßig zu halten und damit auch bauwerkschädliche Unter- und Überschreitungen des Lastniveaus zu verhindern bzw. deutlich zu reduzieren.

Die beiden Spannkraftregler sind an zwei Zugankern (Messstelle 2, südliches Seitenschiff; Messstelle 11, nördliches Seitenschiff; s. auch Bild 21) in das Mauerwerk mittels CVS-Verbundmörtel eingebaut worden (Bild 24).

Während die Anker, die ohne Spannkraftregler nach dem 4. Anspannvorgang fest in das Mauerwerk eingebaut worden sind, wieder einen langsamen Abbau der Zugspannungen aufweisen, halten die Anker der Messstellen 2 und 11, die mit einem Spannkraftregler eingebaut worden sind, die Spannungen nahezu konstant (Bild 25).

Deutlich zeichnet sich in den Messergebnissen die dynamische Belastung des Tag-/Nacht-Rhythmus ab, die auch bei den Anker mit Spannkraftregler – da allerdings deutlich gedämpft – festgestellt werden können. Insgesamt bleiben die Spannungen aber bei den vom Tragwerksplaner vorgegebenen Lasten.

Auffällig verhält sich die Zugstange der Messstelle 6, die zwischen den beiden spannungsgeregelten Zugstangen der Messstellen 2 und 11 im Hauptschiffgewölbe eingebaut worden ist. Dieses Hauptschiffgewölbe übt offenbar durch äußere und innere Einflüsse noch deutliche Formänderungen und damit Spannungswechsel aus.

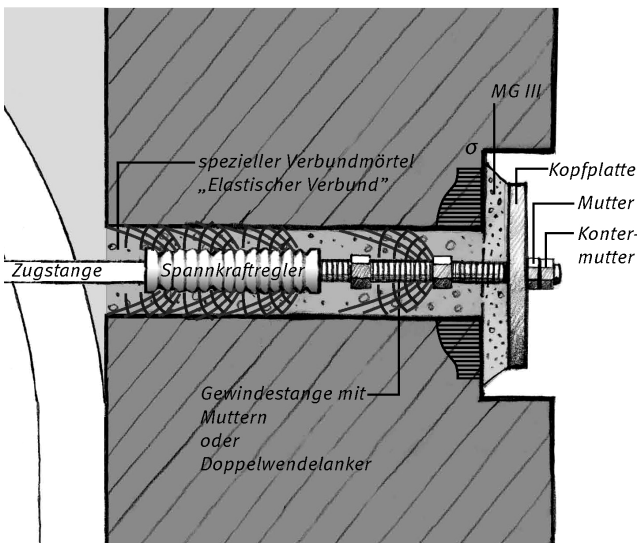
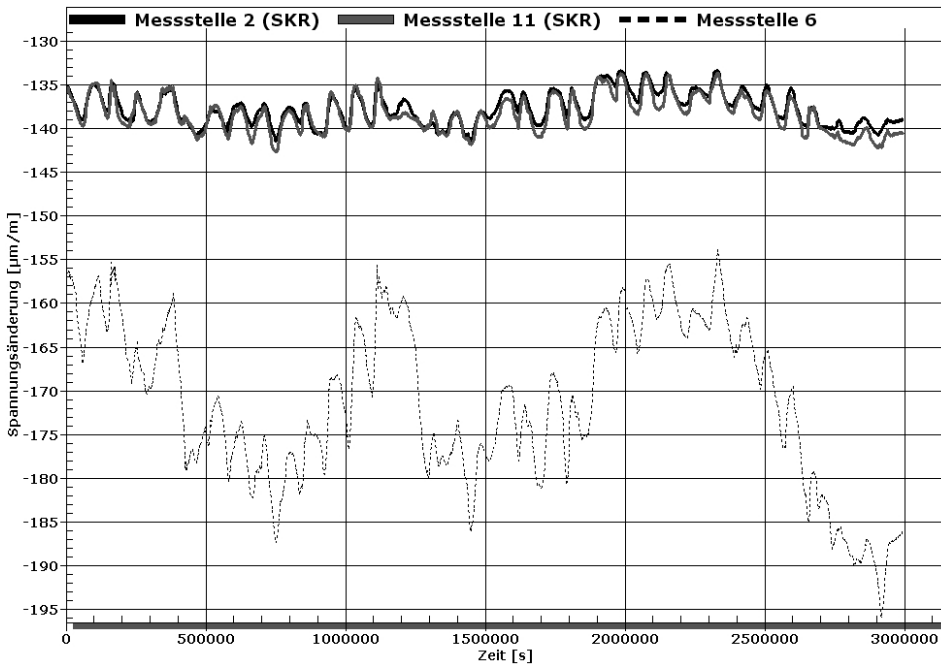


Bild 24. Spannkraftregler (SKR) im eingebauten Zustand (Systemskizze)



**Bild 25.** Spannungsänderungen in  $\mu\text{m}/\text{m}$  in Zugankern einer Messachse über den Messzeitraum vom 10.09. bis 15.10.2010 für die Messstellen 2 und 11 (mit SKR, Seitenschiffgewölbe), die Messstelle 6 (ohne SKR, Hauptschiffgewölbe)

Die Spannkraftregler tragen derzeit dazu bei, dass die beiden eingebauten Zugstangen ihre Tragfunktion langandauernd erfüllen und eine bauwerkschonende und konstruktive Bauwerksicherung erreicht wird.

### 6.2.7 Resümee

Um die Ankerspannung nach dem Anspannen der Anker dauerhaft zu vergleichmäßigen, müssen nach dem derzeitigen Kenntnisstand folgende Punkte beachtet werden:

- langzeitige Überwachung des Spannungszustandes in den Ankern (auch nach Jahren),
- mehrfaches Nachspannen, um u. a. die Kriechverformungen des Mauerwerks zu kompensieren,
- Vergleichmäßigung der Temperatur unterhalb und oberhalb der Gewölbe, um temperaturbedingte ungleichmäßige Spannungszustände in den Gewölben abzubauen,
- punktuelle Lasteinleitung über Kopfplatten allein sollte, wenn möglich, vermieden werden; die Lasteinleitung sollte über eine Art elastischen Verbund erfolgen, um Spannungsspitzen zu vermeiden; dazu müssen entsprechend formulierte mineralische Verbundstoffe eingesetzt werden und
- Temperaturspitzen müssten gemindert werden.

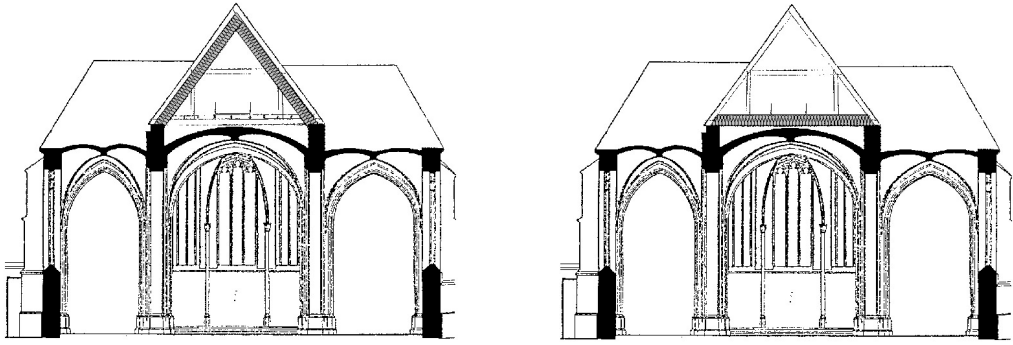
## 6.3 Klimastabilisierung im Bereich der Gewölbe (Forschung) – Maßnahme 4<sup>4)</sup>

Auf den zuvor beschriebenen Untersuchungsergebnissen basierend ist ein Instandsetzungskonzept entwickelt worden, das u. a. die Erhöhung der Tragsicherheit der Mauerziegelgewölbe beinhaltet. Dies wird durch ein speziell entwickeltes Tränkungsverfahren [12] in Abstimmung mit einem anschließend aufgetragenen Gewölbe-Stütz-Putz-System erzielt. Zusätzlich wurde über dem Gewölberücken eine spezielle Wärmedämmkonstruktion bzw. Wärmedämmebene aufgebracht, die von dem Gewölbemauerwerk bewusst abgekoppelt wird, sodass zwischen Wärmedämmebene und Gewölbe ein Luftraum entsteht (Bild 26). Die Wirkung eines solchen Systems wurde anhand von Eignungsversuchen in der Kirche untersucht.

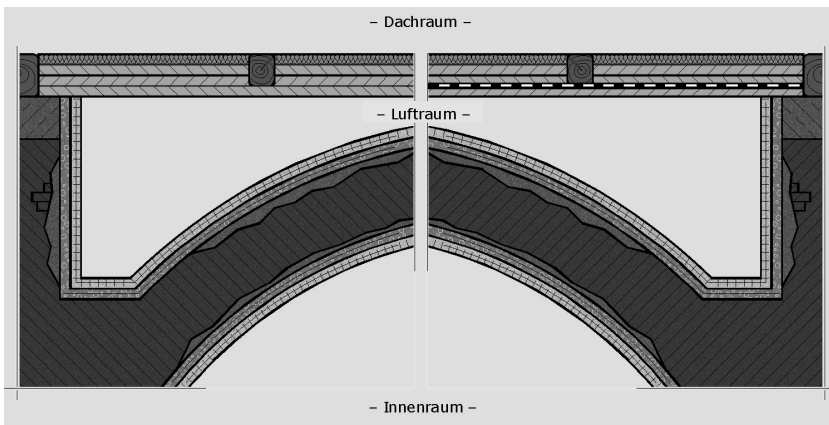
### 6.3.1 Versuchsdurchführung

An einem Gewölbeprobefeld im nördlichen Seitenschiff ist das speziell auf die Situation der Kirche St. Michael abgestimmte Instandsetzungskonzept umgesetzt und über mehrere Jahre hinsichtlich Wirkung und Nutzen untersucht worden (s. auch Bilder 5 und 27).

4) Mitautor: J. Clasen, Essen



**Bild 26.** Übersicht: Dämmung eines Dachstuhls (links), im Vergleich zur vom Gewölbe abgekoppelten Wärmedämmkonstruktion (rechts) (Schnitt durch Kirchenschiff, Systemskizze)



**Bild 27.** Einbau einer vom Gewölbe abgekoppelten Wärmedämmkonstruktion mit (rechts) und ohne (links) Dampfsperre (Systemskizze)

Der Aufbau bzw. die Ausführung des ausgewählten Instandsetzungskonzepts am Gewölbebereich wird nachfolgend kurz erläutert und es wird auf die Konstruktion der Klimaebene eingegangen.

Nachdem das Gewölbemauerwerk im Bereich der Gewölberippen mit einem Lehrgerüst unterstützt worden war, ist der auf dem Gewölberücken vorhandene Wärmedämmörtel („Perlite-Mörtel“) substanzschonend abgenommen und das Mauerwerk gereinigt worden. Anschließend ist das stark in seiner Tragsicherheit reduzierte Gewölbemauerwerk mit einem speziellen Tränkungsmedium (CVS-Gewölbe-Tränkstoff) und einem speziellen Verfahren von oben (Gewölberücken) bis zum Austritt des Tränkungsmediums an der Unterseite (Gewölbebelaubung) getränkt worden. Nach Abschluss der Tränkungsarbeiten und Ausreaktion des Tränkungsmediums ist das Gewölbe-Stütz-Putzsystem, bestehend aus Spritzbewurf, Ausgleichputz und Unterputz mit Putzträger, auf den Gewölberücken aufgetragen worden.

Nach Erhärtung des Gewölbe-Stütz-Putzes auf dem Gewölberücken ist der „Altputz“, der teilweise fest am Gewölbemauerwerk anhaftete, teilweise unter Spannung stand und hohl lag, von der Gewölbebelaubung abgenommen worden. Wie auf dem Gewölberücken erfolgte auch auf der Gewölbebelaubung der Auftrag des Gewölbe-Stütz-Putzsystems.

Nach Abbau des Lehrgerüsts wurde der Oberputz mit einem Putzgewebe zunächst auf den Gewölberücken und später auch auf die Gewölbebelaubung aufgetragen (s. auch Bilder 5 und 27).

Abschließend ist die abgekoppelte Wärmedämmkonstruktion aufgebracht worden (s. auch Bilder 5 und 27). Über dem gesamten Gewölbebereich wurde eine spezielle Konstruktion aus Holzwolleleichtbauplatten (HWL) angebracht, die für die Untersuchungen mittig über dem Gewölbe in zwei Kammern geteilt worden ist. Bei einer der beiden Wärmedämmkonstruktionen wurde auf die untere HWL-Lage, die unmittelbar unter den Balken angeordnet ist, eine doppelte Dampfsperre (Va-

riante I) gelegt (s. auch Bilder 5 und 27); der andere Bereich wurde dampfdiffusionsoffen (Variante II) ausgebildet.

### 6.3.1.1 Auswertung und Diskussion der Ergebnisse

Begleitend zur Ausführung der Instandsetzungsarbeiten sind Untersuchungen zu den Klimaverhältnissen sowie zu den einzelnen Materialeigenschaften am Bauwerk und unter Laborverhältnissen durchgeführt worden. Die Untersuchungsergebnisse werden nachfolgend erläutert und hinsichtlich der Wirkung der Tränkungsmaßnahme, der Wärmedämmkonstruktion und der Gesamtinstandsetzungsmaßnahme beurteilt.

Um eine Vergleichmäßigung der klimatischen Verhältnisse über und unter dem Gewölbe und damit eine „Kontrolle“ über den Salztransport in den stark „versalzten“ Gewölben (s. auch [19, 20]) soweit wie möglich zu erreichen, ist eine abgekoppelte Wärmedämmkonstruktion (Klimaebene) ausgeführt worden. Die Wirkung der getroffenen Maßnahmen wird seitdem mittels Thermohygrographen gemessen (Bild 28). Im Vergleich zu den ohne Wärmedämmkonstruktion herrschenden klimatischen Verhältnissen konnte durch die Wärmedämmebene (Klimaebene), wie zu erwarten war, eine deutliche Vergleichmäßigung der Klimaverhältnisse oberhalb und unterhalb des Gewölbes erreicht werden.

Dabei hat sich die Ausführung ohne Dampfsperre für die gestellten Ziele entgegen den zuvor durchgeführten Berechnungen als günstiger erwiesen.

## 7 Danksagung

Wir bedanken uns bei dem Erzbischöflichen Generalvikariat in Köln und der Kirchengemeinde St. Michael für die Möglichkeit, die aus den vorgestellten Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse an dem Gewölbemauerwerk der St. Michaels Kirche in Elsdorf-Berrendorf umsetzen zu können.

Für die fachliche Unterstützung bedanken wir uns bei den Herren Dipl.-Ing. Arch. Hartmann, Dipl.-Ing. Finck, Dipl.-Ing. Billen, Dipl.-Ing. Krings und Dipl.-Ing. Clasen.

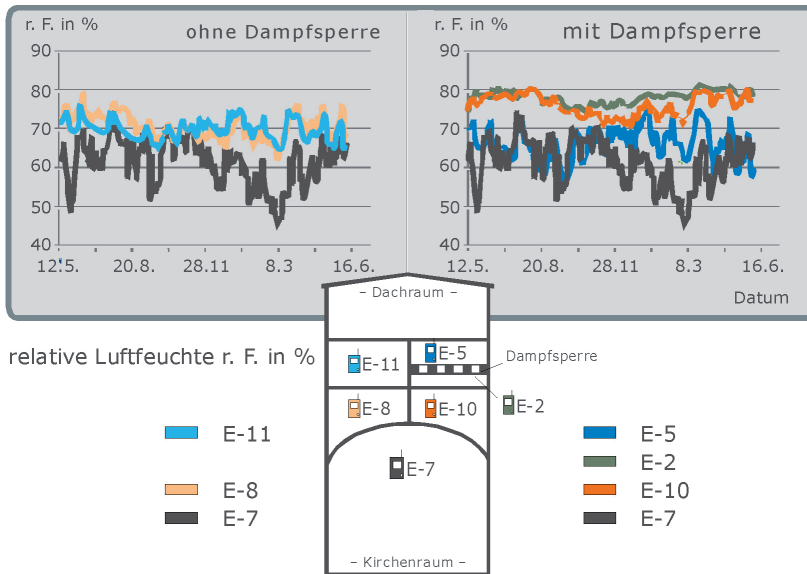
Unser besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Schießl, der uns in der Durchführung von Pilotprojekten auf dem Gebiet der Forschung unter Praxisbedingungen immer bestärkt hat und uns mit seinem fachlichen Rat zur Seite steht.

In der Kirchengemeinde wurden wir insbesondere immer wieder von der Küsterin, Frau Birkner und dem Kirchenvorstandsmitglied, Herrn Schiffer unterstützt.

## 8 Literatur

[1] Koch, S.; Dominik, A.; Desoi, S. et al.: Spannkraftregler und ihre konstruktive Funktion in historischen Gebäuden. In: Tagungshandbuch 2011; TAE 1. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Esslingen 2011.

[2] Dominik, A.: Vortrag: Ein Mauerziegelgewölbe aus dem 16. Jh. im Spannungsfeld der Kräfte – Zugstangen und Spannkraftregler. Messe DENKMAL 2010. 19. 11. 2010 Leipzig.



**Bild 28.** Relative Luftfeuchte r. F. in % über einen Prüfzeitraum von über einem Jahr im Bereich der Wärmedämmkonstruktion im Vergleich mit (rechts) und ohne Dampfsperre (links): Systemskizze zur Lage der Thermohygrographen ober- und unterhalb des Gewölbes

- [3] Dederichs, M.: Die Pfarrei St. Michael in Berrendorf zur Amtszeit von Pfarrer Philipp Rudolf Nottebaum 1886 bis 1908; Zulassungsarbeit zur Abschlussprüfung in katholischer Theologie.
- [4] Kretzschmar, F.: Kirche, Klöster und Kapellen im Erftkreis. 3. überarbeitete Auflage. Rheinland-Verlag GmbH, Köln, 1992, S. 64–65.
- [5] Dokumentation der Restaurierungsarbeiten sowie von Bauspuren in der Kirche St. Michael. Firma Schürholz Schäfer Baugesellschaft mbH, Reichshof-Wehrnath.
- [6] Pläne mittels Laserscan erstellt; durchgeführt und hergestellt von der Firma OE-Planung + Beratung GmbH, Altena.
- [7] Dominik, A.: Abbruch alter Gewölbe verhindert. In: Firmenzeitschrift „remmers aktuell“ 07/2008.
- [8] Bernhard-Remmers Akademie: Symposium zum Thema Gewölbeinstandsetzung der Kirche St. Michael in Elsdorf-Berrendorf; Innovatives Verfahren zur Tragfähigkeitserhöhung von „Kalk-Bimsstein-Gewölbe“. Hamburg 26.10.2010.
- [9] Firma HOWI Fertigteile Ingenieurgesellschaft mbH, Kelberg: Technische Informationen zu Doppel-Wendelankern. 2010.
- [10] Firma Schwenk Putztechnik GmbH & Co. KG; Essen/Ulm: Technische Informationen CVS Mörtelsysteme. 2010.
- [11] Diekamp, A.; Dominik, A.; Schubert, P.: Kriech- und Schwindverhalten von historischem „Kalk-Bimsstein-Gewölbemauerwerk im Vergleich zu neu-zeitlichem „Bimsstein-Gewölbemauerwerk. 15. Internationale Baustofftagung ibaasil, Bauhaus-Universität Weimar, Sept. 2003.
- [12] Dominik, A.: Entwicklung eines Verfahrens zur Tragfähigkeitserhöhung von Gewölbemauerwerk. 1992.
- [13] Dominik, A.; Koch, S.; Link, R.: Zum Feuchtetransport und zur Formänderung von Mauerwerk unmittelbar nach der Herstellung. Materials Science and Restorations, Werkstoffwissenschaften und Bausanierung VI. Tagungsbericht des sechsten internationalen Kolloquiums. Karlsruhe, Sept. 2003.
- [14] Dominik, A.: Dissertation (in Vorbereitung).
- [15] Dominik, A.; Tandina, A. M.: Mineralische Schlammemörtel – Eigenschaftsveränderung im Verbund zu verschiedenen Steinen. In: Werkstoffwissenschaften und Bausanierung, Tagungsbericht des vierten Internationalen Kolloquiums, S. 455–479. Ehingen, Expert 1996.
- [16] WTA Arbeitsgruppe 2.11: Feuchte- und Salzbelastung von Sanierputzen. Protokoll der Arbeitsgruppensitzung, 1997 ([www.wta.de](http://www.wta.de)).
- [17] Heer, B.; Dominik, A.; Schubert, P.: Verfahren zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Sanierputzen. In: Mauerwerk-Kalender 26 (2001), S. 243–254. Hrsg. H.-J. Irmschler und P. Schubert. Ernst & Sohn, Berlin.
- [18] Künzel, H. M.: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten. Dissertation, Universität Stuttgart, Fachbereich Bauingenieur und Vermessungswesen. Stuttgart 1994.
- [19] Rankers, R.; Dominik, A.; Kubanek, T.; Paschmann, H.: Geschädigtes salzhaltiges Mauerziegelgewölbe des 16. Jahrhunderts – Feuchte- und Salztransport. In: 15. Internationale Baustofftagung ibaasil, Bauhaus-Universität Weimar, Sept. 2003. Vortragsnr. 4.08, Tagungsbericht Band 1, S. 1079.
- [20] Kubanek, T.: Einfluss der Klimabedingungen auf den Salztransport in mineralischen Baustoffen. Diplomarbeit Fachhochschule Aachen, Prof. Dr. -Ing. Paschmann/ Dominik Ingenieurbüro. Bornheim/Aachen 2001.
- [21] Dominik, A.; Clasen, J.; Engel, J.; Koch, S.: Ertüchtigung historischer Gewölbe mit speziellen Verfahren. 1. Kolloquium an der Technischen Akademie Esslingen: Erhaltung von Bauwerken. Ostfildern 01.2009.
- [22] Heimsch, R.: Persönliche Mitteilung, 2007.
- [23] Firma Theod. Mahr Söhne GmbH, Heizung und Klimatechnik, Aachen.
- [24] Dominik, A.; Koch, S.: Kirche St. Ursula in Köln: Die Wirkung eines Heizsystems („Temperier- bzw. Konditioniersystem“) auf feuchte- und salzbelastetes Mauerwerk in einem temporär genutzten Gebäude. Forschungsprojekt, gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) Osna-brück. Forschungsbericht F 1006/F-OE. Aachen, Aug. 2008.
- [25] Überprüfung des Sulfatwiderstandes eines Ankeremörtels. Prüfbericht F 6007/45, erarbeitet im Auftrag des Dominik Ingenieurbüros, Bornheim Merten. Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, April 2003.
- [26] Hartmann, W., Bergheim: Persönliche Mitteilungen.
- [27] Krings, W., Rösrath: Persönliche Mitteilungen.
- [28] Clasen, J., Velbert: Persönliche Mitteilungen.
- [29] Dominik, A.; Rankers, R.; Koch, S.; Kubanek, T.: Geschädigtes salzhaltiges Mauerziegelgewölbe des 16. Jahrhunderts – Feuchte- und Salztransport. Festschrift zu Ehren des 60. Geburtstags von Professor Schießl. München, Mai 2003.
- [30] Firma DESOI GmbH, Kalbach/Rhön: Technische Informationen zu Spannkraftreglern. 2010.

Grafische Darstellungen: Dipl.-Ing. Arch. Gerd Sedelies

Wolfram Jäger (Hrsg.)

# Mauerwerk-Kalender 2011

## Schwerpunkt: Nachhaltige Bauprodukte und Konstruktionen

(2011, 665 Seiten, 439 Abb., 182 Tab. Gebunden.)



### Aus dem Inhalt:

#### A BAUSTOFFE, BAUPRODUKTE

- I Eigenschaften von Mauersteinen, Mauermörtel, Mauerwerk und Putzen
- II Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit von Mauerwerksbaustoffen
- III Lehmsteine und Lehmörtel - Nachhaltige Bauprodukte auf dem Weg zur Stoffnorm
- IV Mauerwerksbau mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung

#### B KONSTRUKTION, BAUAUSFÜHRUNG, BAUWERKSERHALTUNG

- I Die Sicherung von historischen Gewölben am Beispiel der Kirche St. Michael in Elsdorf-Berrendorf
- II Einsatz von bewehrtem Mauerwerk
- III Befestigungsmittel für den Mauerwerksbau
- IV Instandsetzung und Ertüchtigung von Mauerwerk, Teil 8: Bewertung von Schädigungsprozessen mithilfe zerstörungsfreier Prüfverfahren

#### C BEMESSUNG

- I Schubtragfähigkeit von Wänden aus Kalksand-Planelementen mit geringem Überbindemaß - Experiment und rechnerische Simulation mit nichtlinearen FE-Methoden
- II Nachweisverfahren für Brücken aus Natursteinmauerwerk

#### D BAUPHYSIK BRANDSCHUTZ

- I Baupraktische Detaillösungen für Innendämmungen mit hohem Wärmeschutzniveau
- II Novelle der EG-Richtlinie über die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden - wesentliche Inhalte und Auswirkungen
- III Neue Instrumente und Zertifizierungssysteme für das Nachhaltige Bauen, erste zertifizierte Gebäude

#### E NORMEN ZULASSUNGEN REGELWERK

- I Geltende Technische Regeln für den Mauerwerksbau (Deutsche und Europäische Normen)
- II Verzeichnis der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für den Mauerwerksbau, Stand 1.11.2010

#### F FORSCHUNG

- I Übersicht über abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben im Mauerwerksbau
- II Die Kollapsanalyse als Werkzeug zur Überprüfung von Schwachstellen an Mauerwerksstrukturen bei Erdbeben



**Fax-Antwort an +49(0)30 47031 240 Ernst & Sohn, Berlin**

Anzahl	Bestell-Nr.	Titel	Einzelpreis*
	978-3-433-02956-5	Mauerwerk-Kalender 2011	<input type="checkbox"/> ca. € 135,- (Einmalbezugspreis) <input type="checkbox"/> ca. € 115,- (Liefen Sie den Mauerwerk-Kalender jährlich nach Erscheinen zum Fortsetzungsbezugspreis**)
	905765	Gesamtverzeichnis Verlag Ernst & Sohn	kostenlos
	2116	Fachzeitschrift Mauerwerk - aktuelle Ausgabe (Probeheft)	kostenlos

Liefer- und Rechnungsanschrift:  privat  geschäftlich

Firma			
Ansprechpartner			Telefon
UST-ID Nr./VAT-ID No.			Fax
Straße/Nr.			E-Mail
Land	-	PLZ	Ort

Wilhelm Ernst & Sohn  
 Verlag für Architektur und  
 technische Wissenschaften GmbH & Co. KG  
 Rotherstraße 21  
 10245 Berlin  
 Deutschland  
 www.ernst-und-sohn.de

Datum/Unterschrift

\*\*Fortsetzungsbezug: Sie sparen € 20,-. Beim Fortsetzungsbezug erhalten Sie die jährliche Ausgabe direkt nach Erscheinen (März) zum günstigeren Fortsetzungspreis zugesandt. Die automatische Belieferung können Sie jederzeit jährlich bis zum 30. Januar für die folgende Ausgabe stoppen.

\*€-Preise gelten ausschließlich in Deutschland. Alle Preise enthalten die gesetzliche Mehrwertsteuer. Die Lieferung erfolgt zuzüglich Versandkosten. Es gelten die Lieferungs- und Zahlungsbedingungen des Verlages. Irrtum und Änderungen vorbehalten. Stand: Mai 2011 (homepage\_Probekapitel)

