

# Schallemissionsprüfung bei der experimentellen Tragsicherheitsbewertung von historischen Natursteinsäulen

Gerd KAPPAHN\*, Lutz FIEDLER\*,  
\* Ingenieurgesellschaft für experimentelle Mechanik mbH

**Kurzfassung.** An verschiedenen Beispielen denkmalgeschützter Natursteinsäulen wird die Anwendung der Schallemissionsprüfung bei Belastungsversuchen zur Ermittlung des Tragverhaltens vorgestellt.

Das Verfahren liefert Zusatzinformationen zum Tragverhalten und dient vor allem zur Absicherung der Versuche gegen sprödes Bauteilversagen.

Wie die dargestellten Beispiele – historische Natursteinsäulen – zeigen, muss der Einsatz und besonders die Interpretation der Messergebnisse auf die jeweiligen Randbedingungen abgestimmt werden. Die Materialstruktur, vorhandene Risse und Inhomogenitäten, mögliche Versagensmechanismen sowie die Signaldämpfung können auch bei scheinbar ähnlichen Aufgaben zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Auch wenn die Algorithmen zur Signalortung oft nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen, gilt fast immer die These „Riss vor Bruch“, so dass der grundsätzliche Vorteil gegenüber anderen Messverfahren, nämlich die Überwachung ausgedehnter Volumina, fast immer ausgenutzt werden kann. Dies gilt besonders dann, wenn einzelne Bereiche messtechnisch anders kaum zugänglich sind.

## 1 Einleitung

An verschiedenen Beispielen wird die Leistungsfähigkeit der Schallemissionsprüfung zur Beurteilung des Tragverhaltens historischer Natursteinsäulen diskutiert. Zerstörungsfreie Verfahren, wie Georadar oder Ultraschall sind hervorragend geeignet, Fehlstellen und Inhomogenitäten zu erkunden. Sie ermöglichen eine Klassierung der Bauteile z. Bsp. nach der Ultraschallgeschwindigkeit in kritisch bzw. weniger oder unkritisch. Aussagen über die tatsächliche Tragfähigkeit ermöglichen sie jedoch nicht. Diese sind nur mithilfe eines Belastungstests möglich. Das Konzept der experimentellen Tragsicherheitsbewertung geht davon aus, dass ein, mit einer Berechnung vergleichbares, Sicherheitsniveau durch die Erhöhung der Belastung um einen entsprechenden Sicherheitsfaktor  $>1$  erzielt wird. Damit dieses Verfahren auch wirklich zerstörungsfrei ist, sind entsprechende experimentelle Erfahrungen und der Einsatz verschiedener, möglichst redundante Informationen liefernder, Messverfahren erforderlich. Gerade bei, zu sprödem Versagen neigenden, Natursteinsäulen kommt der Schallemissionsprüfung neben Dehnungs- und Stauchungsmessungen bei Belastungsversuchen große Bedeutung zu.

Belastungsversuche wurden an brandgeschädigten Granitsäulen der Kirche St. Josef in Mannheim, an eintausendjährigen Sandsteinsäulen der Michaeliskirche in Hildesheim und an ausgebauten Säulenfragmenten und –schäften sowie Säulen im eingebauten Zustand aus „Pyrenäen- Marmor“ im Neuen Museum Berlin durchgeführt. Die beiden letzten Objekte stehen auf der UNESCO Liste des zu schützenden Weltkulturerbes.

## 2 Kalksteinsäulen im Neuen Museum Berlin

Das nach den Plänen *Friedrich August Stülers* zwischen 1841 und 1859 errichtete Neue Museum Berlin bildet sowohl als Teil der Gesamtanlage der Museumsinsel wie auch als Einzelbauwerk des späten Klassizismus eines der bedeutendsten Dokumente des Museumsbaus im 19. Jahrhundert.

Im Rahmen des Wiederaufbaus wurde ein umfangreiches Untersuchungsprogramm unter Einbeziehung der experimentellen Tragsicherheitsbewertung durchgeführt mit dem Ziel, möglichst viel originale Bausubstanz zu erhalten [1,2].

In einzelnen Ausstellungsräumen befinden sich Säulenreihen aus unterschiedlichen Natursteinmaterialien (Sandstein, Marmor, Kalkstein). Die Säulen stellen ein wesentliches lastabtragendes Element dar. Teilweise erhalten diese Säulen nach dem Wiederaufbau höhere Lasten, die aus dem Museumsbetrieb oder der Nutzung der Dachebene als Technikgeschoss resultieren. Bedingt durch die lange Standzeit als Ruine ist der Erhaltungszustand der Säulen sehr unterschiedlich. Als besonders kritisch haben sich dabei die Säulen aus Kalkstein der Sorte „marble campan melange“, die nur bedingt für den Außeneinsatz geeignet sind, herausgestellt. Das Material ist stark inhomogen mit an den Außenflächen sichtbaren farblich und in der Orientierung unterschiedlichen Maserungen, die ein dekoratives und edles Aussehen bewirken. Während der überwiegende Teil der Säulen die Nachkriegsjahre bei zum Teil freier Bewitterung an seinen ursprünglichen Einbauorten verbracht hat, befanden sich zwei intakte und vier zerbrochene Säulenschäfte im Depot.

Um die historische Konstruktion als technisches Denkmal zu erhalten, sollten möglichst alle noch vorhandenen Säulen und Bruchstücke wieder eingebaut und auch als vollwertige Tragglieder genutzt werden. Eine Auswertung der historischen Literatur ergab, dass ursprünglich Nutzlasten von  $2 \text{ kN/m}^2$  angenommen wurden. Die aktuellen Lastannahmen gehen von  $5 \text{ kN/m}^2$  zuzüglich Belastungen aus einem neuen Technikgeschoß aus.

Es war schnell klar, dass die Tragsicherheit für die inhomogenen Kalksteinsäulen allein rechnerisch nicht nachweisbar ist, zumal Messungen mit Ultraschall und Georadar örtlich Risse, Klüftungen und Bruchzonen offenbart haben [5].

Zur Ermittlung des Tragverhaltens wurde ein mehrstufiges Untersuchungsprogramm für eine ergänzende experimentelle Tragsicherheitsbewertung erarbeitet.

Die zerstörungsfreien Untersuchungen mit Georadar und Ultraschall erlauben eine Katalogisierung aller Säulen und Bruchstücke. In einer Säule wurde ein Metalldübel lokalisiert, der offensichtlich bereits vor dem Einbau einer Säule zur Reparatur eingesetzt wurde. Zum Nachweis der erforderlichen Tragsicherheit wurde der Ansatz der hybriden Statik [1], bei der die Rechenannahmen anhand experimenteller Verfahren überprüft werden, angewandt. Die experimentellen Untersuchungen wurden in drei Stufen vorgenommen.

Stufe 1: Tastversuche an Säulenfragmenten zur Beurteilung des Verbundverhaltens

Stufe 2: Belastungsversuche an erhaltenen ausgebauten Säulenschäften

Stufe 3: Belastungsversuche an eingebauten Säulen

Für die Stufen 1 und 2 wurde eine mobile Belastungseinrichtung mit Lastkreuzen und Hydraulikzylindern zur Lasteinleitung konzipiert. Diese erlaubt eine Belastung sowohl an der liegenden als auch stehenden Säule, so dass ein Transport der kostbaren Säulenschäfte vermieden werden konnte. Außerdem war durch den Einsatz von vier Hydraulikpressen eine exzentrische Lasteinleitung möglich.

Über die experimentelle Tragsicherheitsbewertung, die von der Ingenieurgruppe Bauen Karlsruhe Berlin und der Prof. Steffens Ingenieurgesellschaft Bremen konzipiert und durchgeführt wurden, wird ausführlicher in [3,4] berichtet.

An dieser Stelle sollen die Aspekte des Einsatzes der Schallemissionsprüfung vorrangig behandelt werden.

Kalkstein besitzt je nach Varietät und Herkunft eine sehr unterschiedliche Ultraschallgeschwindigkeit, die zwischen 2200 ...6000m/s schwanken kann. Bei dem Sedimentgestein tritt entstehungsbedingt eine starke Anisotropie der Schallgeschwindigkeit auf. Risse und Schalenbildungen verstärken diesen Effekt noch. Belastungsversuchen unterzogen wurden die Säulen, die Bereiche mit besonders niedriger Schallgeschwindigkeit und großen Inhomogenitäten aufweisen.

Für die Schallemissionsanalyse bedeutet das, wie bei fast allen Massivbauwerken, dass laufzeitbasierte Ortungsverfahren höherer Ordnung (2D, 3D) nicht zu befriedigenden Ergebnissen führen. Besser ist die Vergrößerung der Anzahl der Sensoren in Kombination mit einer zonalen Ortung. In Einzelfällen, mit geringeren Anforderungen an die Ortungsgenauigkeit, kann eine lineare Ortung zum Einsatz kommen.



**Abbildung 1** Zustand Anfang 2007; im Vordergrund eine Säule aus Bruchstücken zusammengesetzt; hell: Saalburger Kalkstein, dunkel :Originalmaterial

## 2.1 Versuche an ausgebauten Säulenschäften

An den Säulenschäften wurden 8 Schallemissionssensoren linear über dem Säulenumfang verteilt angeordnet. Da sich der Basis- und Kapitellbereich bereits bei den Versuchen der Stufe 1 an Fragmenten als kritisch herausgestellt haben, wurden hier jeweils zwei Sensoren pro Messkanal eingesetzt, so dass insgesamt 6 Schallemissionskanäle zum Einsatz kamen. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 2.

An Säule 3 erwies sich die nachträglich angebrachte Vierung, die zur Verbesserung der Lasteinleitungsfläche gedacht war, als potenzielle Schwachstelle. Bei exzentrischer Belastung am oberen Schaftbereich kam es hier zu einem spröden Versagen eines auskragenden Teils des nachträglich eingesetzten Steinmaterials. Dies zeigt sich an einer schlagartigen Zunahme der Schallemission an Kanal 1 (s. Abbildung 3 und 4). Für ein derartiges Ereignis gibt es nur eine kurze Vorankündigung hinsichtlich des Anstiegs der

Schallemission. Versuchstechnisch ist bei zentrischer Belastung eine sofortige Entlastung möglich, was für exzentrisch eingetragene Lasten nicht so ohne weiteres gelingt.

Insgesamt haben die Versuche im ausgebauten Zustand gezeigt, dass die Säulen für zentrische Lasten problemlos tragfähig sind, Lastexzentrizitäten aber nur in bestimmten Grenzen zulässig sind. Beim Wiedereinbau wurde diesem Aspekt deshalb besondere Sorgfalt gewidmet.



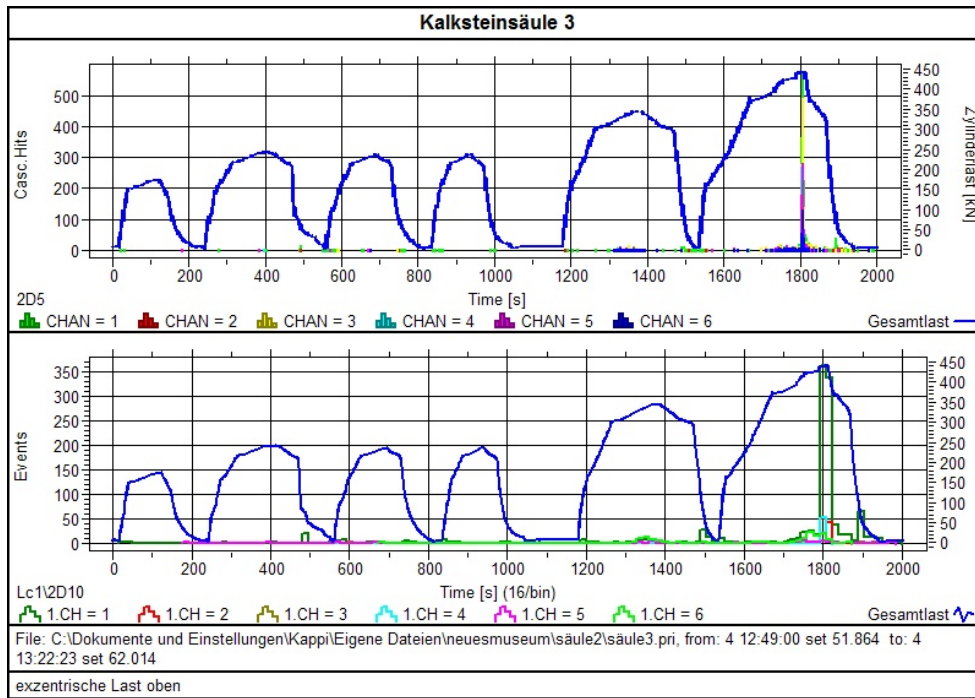
**Abbildung 2** Versuchsaufbau für Säulenschäfte im Depot

## 2.2 Säulen im Einbauzustand

Eine historische Säule im Bacchussaal wurde offensichtlich bereits vor ihrem Ersteinbau aus zwei Bruchstücken repariert, worauf ein zerstörungsfrei ermittelter Metallhorn und ein durchlaufender Riss etwa in Säulenmitte hindeuten. Diese Säule wurde im eingebauten Zustand belastet. Hier wurde die Last über definiert vorgespannte Klemmringe im oberen und unteren Schaftbereich eingetragene. Zur Lastübertragung, Toleranzausgleich und Erhöhung der Reibung diente eine Zwischenlage aus Buchenholzstäben. Der Vorteil dieser Anordnung besteht darin, dass die Säule nicht ausgebaut und die bereits vorhandene Auflast mit ihren Exzentrizitäten durch die Versuchseinrichtung nicht noch zusätzlich aufgebracht werden muss. Insgesamt 13 SE-Sensoren wurden oben und unten um den Riss angeordnet. Da Reibsignale aus der Lasteinleitung nicht auszuschließen waren, wurde ein zusätzlicher Kontrollsensor auf der unteren Manschette angebracht um Störsignale aus diesem Bereich zu separieren. In Abbildung 5 ist die untere Manschette mit Kontrollsensor zu sehen. Abbildung 6 zeigt Hit und Energieraten für die Laststeigerung bis zur Maximallast. Die registrierte Schallemission kann komplett der Lasteinleitung zugeschrieben werden. Der Riss zeigt keinerlei Aktivität. Insbesondere nach ca. 100s. kommt es zu einem kurzen Verrutschen der Manschette, was sich in wenigen sehr energiereichen Signalen äußert.

Im Modernen Saal wurden die eingelagerten Säulen und Bruchstücke, ergänzt durch neues Material aus einem Steinbruch in der Nähe von Saalburg in Thüringen, wieder eingebaut und tragen ein Technikgeschoss (Abbildung 1).





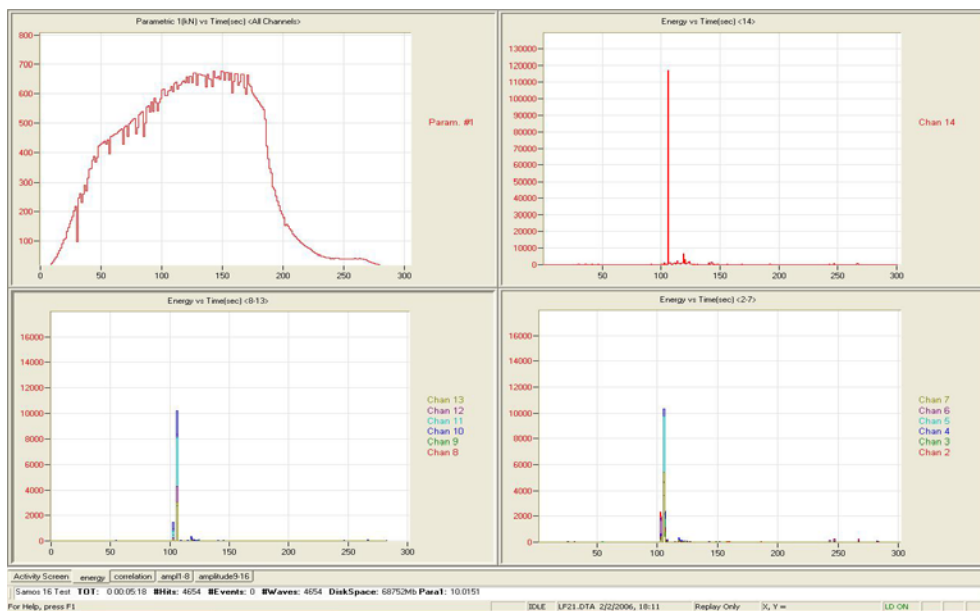
**Abbildung 3** Sprödes Absprengen der Vierung bei exzentrischer Belastung



**Abbildung 4** Abgesprengte Vierung nach exzentrischer Belastung



**Abbildung 5** Kontrollsensor Ch14 an der unteren Manschette



**Abbildung 6** Bachhussaal, Ziellast  $\Sigma F = 670\text{kN}$ , Verrutschen der Manschette nach ca. 105s

### 3 Granitsäulen der Kirche St. Josef in Mannheim

In dieser Kirche handelte es sich um während des Krieges durch Brandeinwirkung geschädigte Granitsäulen. Die Säulen waren bereits durch Metallmanschetten fixiert. Die Untersuchungen fanden wieder im Einbauzustand statt, so dass nur die Verkehrslasten mit ihren Sicherheitsbeiwerten aufzubringen waren.

An der glatten, polierten Oberfläche war eine gute Sensorankopplung mit geringer Signaldämpfung gewährleistet. Es wurden insgesamt neun Sensoren in drei Kreisen über den Umfang verteilt. Aufgrund der geringen Signaldämpfung im Granit war eine komplette Überwachung des Säulenvolumens gewährleistet.

Bei allen Belastungszyklen ist die Schallemissionsfreisetzung auf geringem Niveau. Bei beiden Säulen tritt die Schallemission hauptsächlich an den unteren Sensoren S3, S6 und S9 auf.



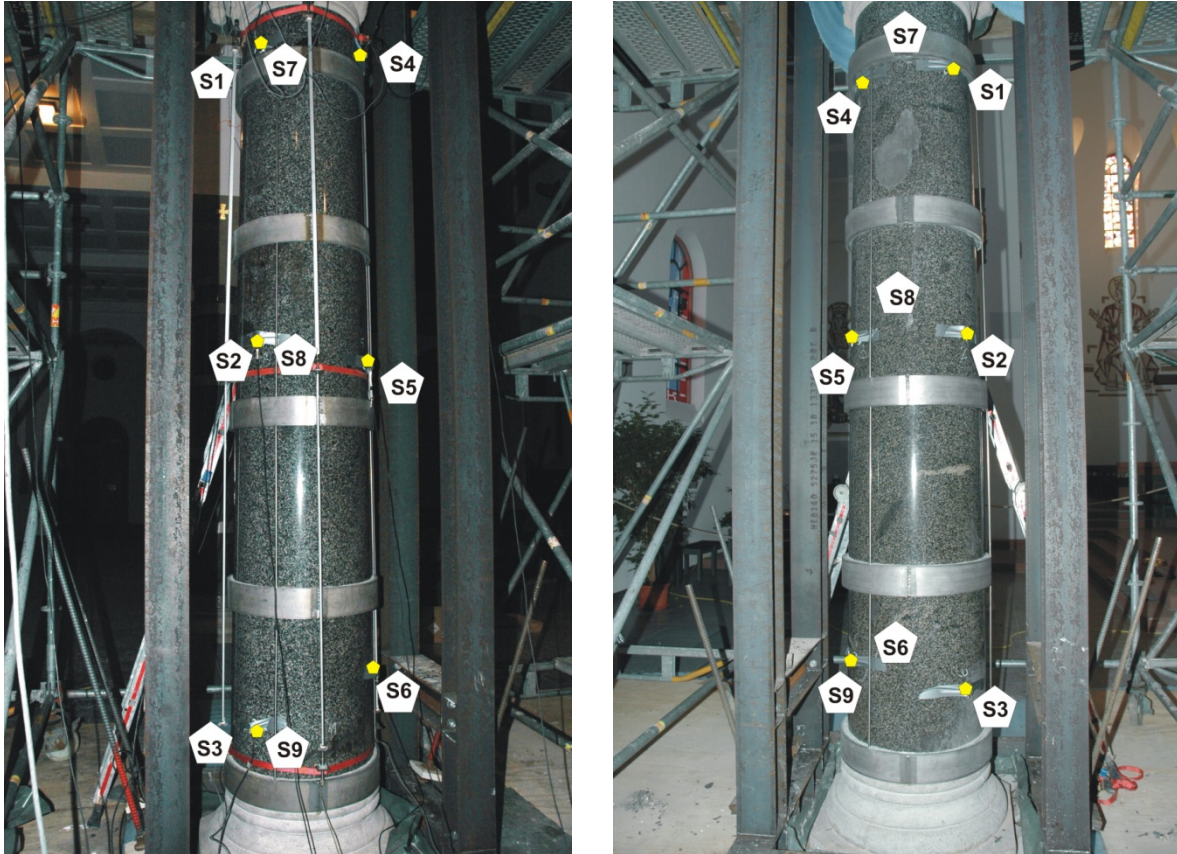


Abbildung 7 a,b Sensoranordnung an beiden Granitsäulen der Kirche St. Josef

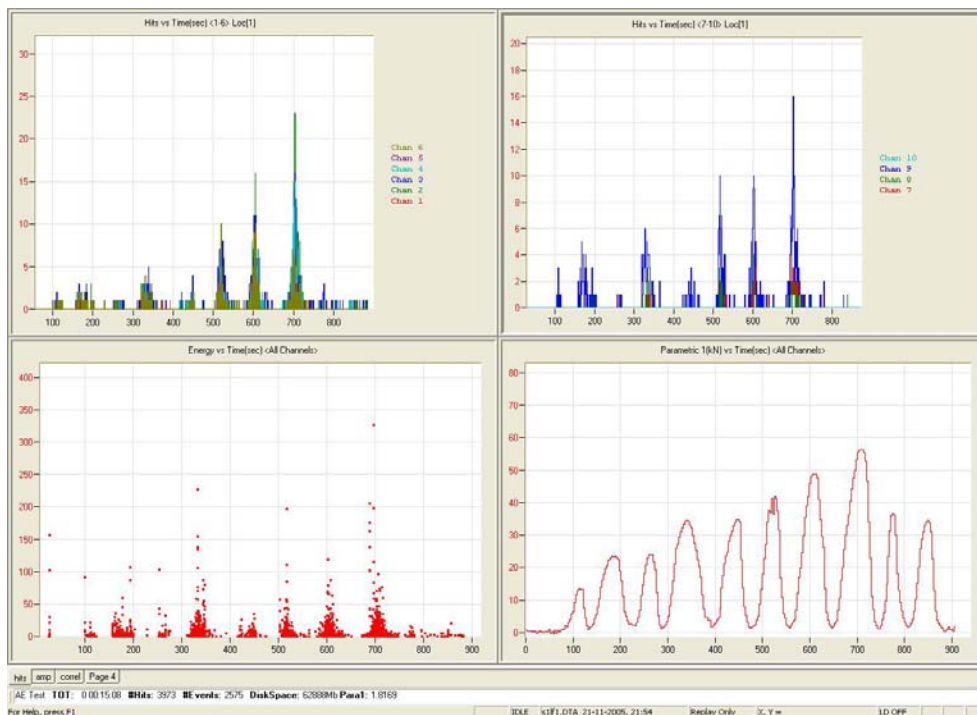


Abbildung 8 Belastungszyklen und registrierte Schallemission Säule 1, Kirche St. Josef

Die Ergebnisse lassen sich so interpretieren, dass über die Rissflanken in gewisser Lastabtrag stattfindet, neue Risse infolge der aufgebracht Belastung aber nicht entstehen.

Auch ein größeres Risswachstum oder Rissuferverschiebungen treten nicht auf (Abbildung 7, 8).

#### **4 Sandsteinsäulen der Kirche St. Michael in Hildesheim**

Wegen der Möglichkeit der Überwachung von Volumina wurden die Sensoren an den Säulen der Michaeliskirche hauptsächlich in den messtechnisch anders kaum zugänglichen Bereichen wie Anschluss der Säule an Basis und Kapitell angeordnet. In diesen Bereichen sollten mögliche unter Belastung stattfindende Rissbildungen frühzeitig erkannt werden. Belastungstests unterzogen wurden drei, teilweise 1000 Jahre alte Säulen. Die Säulen wurden wieder im Einbauzustand mit voll wirksamen Eigenlasten belastet.

Die zu untersuchenden Säulen weisen sowohl in der Sandsteinsäule selbst als auch in Basis und Kapitell stark heterogene Strukturen auf. Es gibt deutliche Riss- und Schalenbildungen.

Bei der Sensorpositionierung wurde versucht, möglichst massive Bereiche zu erfassen, eine Gewähr, dass immer die am Lastabtrag beteiligten Bereiche erfasst werden, gibt es aber nicht. Die Sensorankopplung an der relativ rauen Oberfläche führt zu einer zusätzlichen Signalschwächung. Aus diesem Grund ist bei der Auswertung bereits geringen Signalraten erhöhte Aufmerksamkeit zu widmen.

Bei den Versuchen an allen drei Säulen zeigt sich, dass in der Säule selbst keine Schallemissionssignale entstehen. Auch am Kapitell treten nur geringe Signalraten auf. Einen Schwachpunkt bilden die Basen. In diesem Bereich treten auf Ziellastniveau einzelne, zwar geringe, aber mit der Last korrelierende Schallemissionen auf.

Alle Säulen erwiesen sich auch unter erhöhten Gebrauchslasten als ausreichend tragfähig

#### **5 Schlussfolgerungen**

Die Schallemissionsprüfung ist ein wertvolles Hilfsmittel bei in situ Belastungsversuchen an Stützen und Säulen. Sie liefert Zusatzinformationen zum Tragverhalten und dient als Absicherung der Versuche gegen sprödes Bauteilversagen.

Wie die dargestellten Beispiele historischer Natursteinsäulen zeigen, muss der Einsatz und besonders die Interpretation der Messergebnisse auf die jeweiligen Randbedingungen abgestimmt werden. Die Materialstruktur, vorhandene Risse und Inhomogenitäten, mögliche Versagensmechanismen sowie die Signaldämpfung können auch bei scheinbar ähnlichen Aufgaben zu ganz unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Auch wenn die Algorithmen zur Signalortung oft nicht zu den gewünschten Ergebnissen führen, gilt fast immer die These „Riss vor Bruch“, so dass der grundsätzliche Vorteil gegenüber anderen Messverfahren, nämlich die Überwachung ausgedehnter Volumina, fast immer ausgenutzt werden kann. Dies gilt besonders dann, wenn einzelne Bereiche messtechnisch anders kaum zugänglich sind. Die Schallemissionsprüfung ist aber immer nur eine Ergänzung zu anderen Messverfahren, wie Durchbiegung, Dehnung, Neigung etc. Von einem alleinigen Einsatz dieses Verfahrens zur Beurteilung der Tragfähigkeit muss abgeraten werden.



## Referenzen

- [1] K. Steffens, „Experimentelle Tragsicherheitsbewertung von Bauwerken, Grundlagen und Anwendungsbeispiele, *Ernst&Sohn* Berlin 2002
- [2] G. Eisele, M. Gutermann, J. Seiler, K. Steffens, „Wiederaufbau des Neuen Museums in Berlin; Tragwerksplanung pro Denkmalpflege, *Bautechnik* 81 (2004), Heft 6 S.407-422
- [3] G. Eisele, “Tragenfähigkeitsbewertung an Natursteinsäulen am Neuen Museum in Berlin, *Natursteinseminar 2006*, Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, ISBN 3-8167-7016-9, Seite 19-28
- [4] G. Eisele, M. Gutermann, K. Steffens, “Natursteinsäulen unter Druck – Tragsicherheitsbewertung von Kalksteinsäulen im Neuen Museum Berlin, *STEIN - Zeitschrift für Naturstein*, Ausgabe S. 10, Oktober 2006, Seite 36 -39, Callwey-Verlag München
- [5] W. Köhler, „Zerstörungsfreie Rissuntersuchungen an Natursteindenkmalen, *Tagungsband Natursteinsanierung 2005*, Stuttgart: Fraunhofer IRB-Verlag, 2006, ISBN 3-8176-6718-4, S. 105-116