

# Untersuchung einer Natursteinsäule mittels Schallemissions- und Ultraschalltransmissionsanalyse

Tim WEIRICH, Jürgen FRICK  
MPA Universität Stuttgart, Pfaffenwaldring 2b, 70569 Stuttgart

**Kurzfassung.** Die Sanierung und Instandsetzung von historischen Gebäuden und Denkmälern nimmt bereits heute einen großen Stellenwert in der Baupraxis ein. In Deutschland sind mehrere Millionen Bauwerke als „eingetragene Baudenkmäler“ in die so genannten Listen als „geschützte Denkmale“ von den entsprechenden Landesdenkmalämtern erfasst worden. Sie reichen von archäologischen Stätten bis hin zu modernen Betonbauwerken. Zur Untersuchung solcher Bauwerke haben sich insbesondere die zerstörungsfreien Prüfmethoden, wie Ultraschall, Radar oder Thermographie, durchgesetzt. Sie bieten die Möglichkeit, sowohl eine erste Voruntersuchung zur genaueren Planung einer Instandsetzung durchzuführen als auch die Nachhaltigkeit bereits durchgeführter Instandsetzungen nachzuweisen. Am Beispiel einer restaurierten Natursteinsäule von der so genannten Lusthausruine im mittleren Schlossgarten in Stuttgart soll der Einsatz von zerstörungsfreien Prüfmethoden für den Nachweis der Standsicherheit nach einer Instandsetzung erläutert werden. Dazu wurde die Säule in Anlehnung an die Richtlinie des DAfStb („Belastungsversuche an Betonbauwerken“) in 3 Laststufen mit einer Probelastung bis max. 20,0 kN beansprucht. Neben der Aufnahme der Verformungen über Wegaufnehmer wurden zur weiteren Überwachung während den Be- und Entlastungsphasen sowohl Schallemissionsuntersuchungen (SEA), als auch Messungen zur Ultraschalltransmission (UTA) durchgeführt. Eine anschließende Analyse der auftretenden Signale gibt dann Aufschluss über den Zustand des Gefüges bzw. die Lage von Rissen, und lässt eine Aussage über das Wachstum vorhandener Risse zu.

## 1. Einführung

Am Beispiel einer restaurierten Natursteinsäule aus dem Alten Lusthaus in Stuttgart (siehe Abb.1) soll die Anwendung verschiedener Untersuchungsmethoden für den späteren Einsatz bei vergleichbaren Prüfkörpern untersucht werden. Neben den Titelgebenden Verfahren der Schallemissions- und Ultraschalltransmissionsanalyse kamen begleitend visuelle Risskontrollen sowie eine Überwachung der Verformungen mittels induktiver Wegaufnehmer zum Einsatz, auf die im Folgenden ebenfalls kurz eingegangen werden soll. Ziel der Untersuchungen ist es Veränderungen im Säulenmaterial (z.B. aufgehende Risse, Inhomogenitäten im Material) zu erkennen, um am Ende der Probelastung eine Aussage über die Standfestigkeit der Säule und ggf. erforderliche Sicherungsmaßnahmen machen zu können.

## 2. Instandsetzung der Säule

Die untersuchte Säule stammt aus der Ruine des Alten Lusthauses in Stuttgart (siehe Abb.1). Anfangs stand das im 16. Jahrhundert erbaute Renaissancegebäude an der Stelle des Kunstgebäudes am Schlossplatz. Berühmtheit erlangte es insbesondere durch seinen Ballsaal, der von einer freitragenden bemalten Fassade überspannt war. Später diente das Lusthaus ebenfalls als herzogliches und königliches Hoftheater, bis es 1902 einem Brand zum Opfer fiel. Daraufhin wurde zur Erinnerung an das Alte Lusthaus der Treppenaufgang im Mittleren Schlossgarten wiederaufgebaut. In den vergangenen Jahrzehnten haben Verwitterungsprozesse jedoch ihre Spuren an dem Bauwerk hinterlassen, so dass eine umfangreiche Instandsetzung unumgänglich war.



**Abbildung 1:** Ruine des alten Lusthauses im mittleren Schlossgarten, Stuttgart

Dazu wurden die Oberflächen der Säulen vor ihrem Abbau mit Hilfe von Kieselsäureester gefestigt, um eine zusätzliche Schädigung der bereits stark verwitterten Säulen nicht noch zusätzlich zu vermeiden. Bei der im weiteren Verlauf untersuchten Säule handelt es sich um eine Altansäule mit einer Höhe von 2,52 m und einem max. Durchmesser von ca. 30,0 cm. Abb.2 zeigt die Säule noch vor der Restaurierung, zerbrochen in zwei Teile, wobei der größere untere Teil zusätzlich in zwei Teile längs des massiven Risses zerbrochen war. Sie wies die stärksten Schädigungen auf. Zusammengefügt wurde die Säule punktuell mit Edelstahlgewindestangen und gefülltem Epoxydharz mit Stellmittel. Die flächige Verfüllung der Risse erfolgte mit gefülltem Kieselöl, dessen Festigkeit geringer als der Stein gewählt wurde, um eine weitere Schädigung des Steines auszuschließen. Des Weiteren wurden zwei Verstärkungsringe (siehe. Abb.2, rechts), am oberen Rand und auf Zweidritteln der Höhe angebracht [pers. Mitteilung des Restaurators Hr. Kürten].



**Abbildung 2:** Altansäule: im Ausgangszustand und restauriert

### 3. Untersuchungen

#### 3.1 Allgemeine Hinweise

Für die Altansäule (Säule mit der stärksten Schädigung) wurde im Labor der MPA eine Probelastung bis zu einer max. Belastung von 20 kN, der künftigen Einbaulast, durchgeführt. Dazu wurde die Säule im Kopfbereich über einen Hydraulikzylinder und eine ausreichende dicke Stahlplatte mit einem statischen Druck belastet. Ähnliche Versuche, an denen man sich orientieren konnte, wurden bereits im Rahmen einer „Tragsicherheitsbewertung von Kalksandsteinen im Neuen Museum Berlin“ [1] bzw. bei der Untersuchung der „Michaeliskirche in Hildesheim“ [2] durchgeführt.

Neben der Aufnahme der Dehnungen über Wegaufnehmer wurden zur weiteren Überwachung während den Be- und Entlastungsphasen sowohl Schallemissionsuntersuchungen (SEA), als auch Messungen zur Ultraschalltransmission (UTA) durchgeführt. Die Belastung der Säule erfolgte über insgesamt 7 Tage. Dabei wurde die max. Last von 20 kN in Anlehnung an die Richtlinien des DAfStb [3] stufenweise aufgebracht, wie in folgendem Auszug aufgeführt:

*„Belastung bis zur Versuchsziellast. Prüflast ist in mindestens 3 Laststufen aufzubringen. Dabei ist nach jeder Laststufe mindestens einmal zu entlasten. Für jede Laststufe und Entlastung ist eine angemessene Standzeit vorzusehen.“*

Den genauen Belastungsverlauf, sowie die Verteilung der Sensoren (bzw. Ebenen) kann Abb.3 entnommen werden. Zu beachten ist dabei, dass bereits durch den Aufbau aus Hydraulikzylinder und Stahlrahmen auf die Säule eine Vorbelastung von ca. 2,0 kN wirkt, die zu der maximal aufgebrauchten Last hinzuaddiert werden muss.

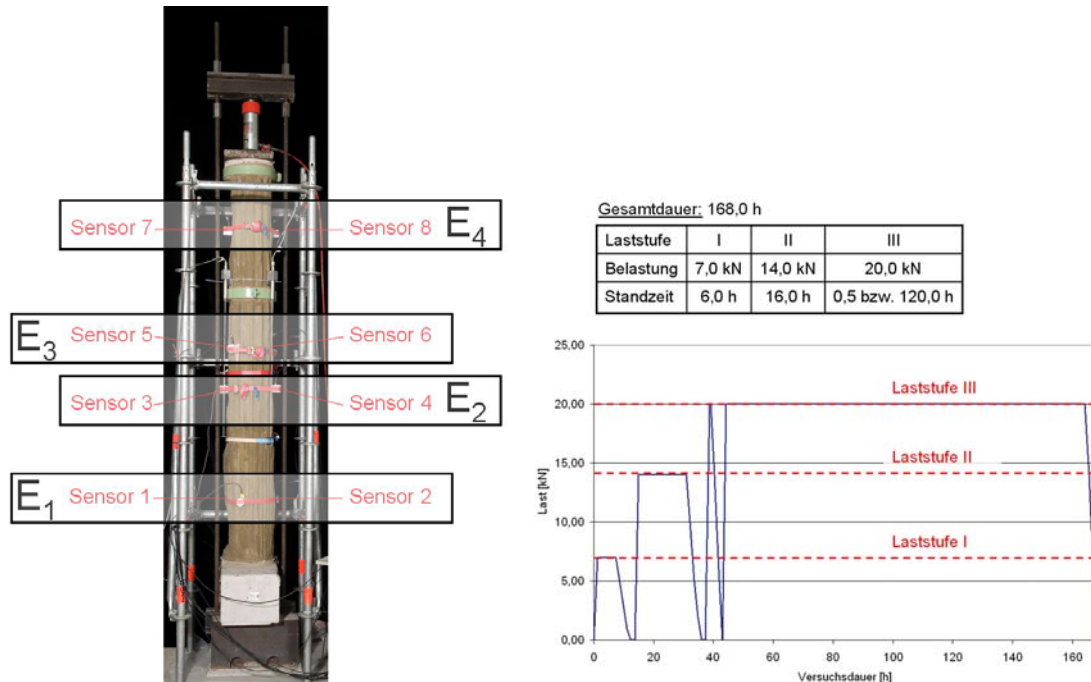


Abbildung 3: Belastungsverlauf und Verteilung der Sensoren 1 bis 8

#### 3.2 Rissbreitenmessung

Bereits nach dem Transport der Säule in die Labore der MPA konnte im Fußbereich der Säule ein neu aufgegangener Riss erfasst werden. Dieser Riss durchzog den gesamten Querschnitt, da er sowohl auf der Vorderseite, als auch auf der Rückseite der Säule zu

erkennen war. Somit konnte ausgeschlossen werden, dass er nur oberflächlich auftritt. Um die Entwicklung der Rissbreite während der gesamten Probelastung weiter zu verfolgen, wurde der Riss mittels Risslupe und Risslineal sowohl vor der Probelastung, als auch nach jeder Laststufe visuell ausgemessen. Es zeigte sich, dass insbesondere während Laststufe II eine geringe Zunahme der Rissbreite zu registrieren war (siehe Abb.4) Dennoch ist dieses moderate Risswachstum als unkritisch zu beurteilen.

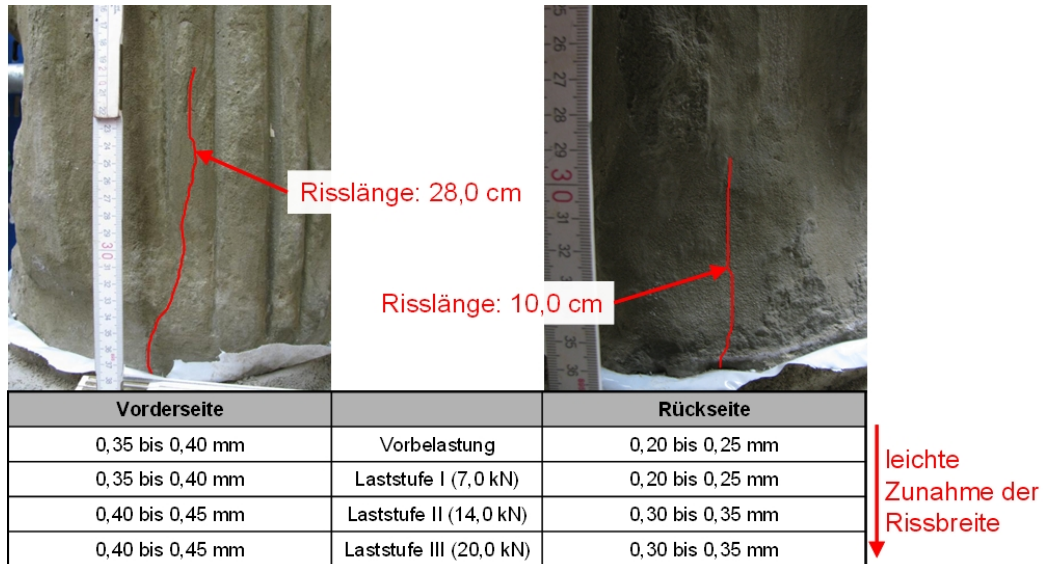
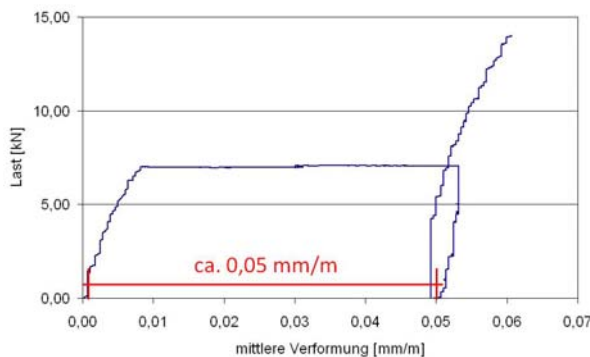


Abbildung 4: Risswachstum im Fußbereich der Säule

### 3.3 Verformungsmessung

Die Belastung der Säule durch eine Probelastung führt zu Verformungen des Materials, die direkt über Wegaufnehmer aufgezeichnet werden können. Dazu wurden drei induktive Wegaufnehmer gleichmäßig über den Säulenumfang, d.h. 120° zueinander versetzt, angebracht. Aus den Ergebnissen konnte dann die mittlere Verformung berechnet werden. Um die Denkmalsubstanz zu schonen, wurden die Wegaufnehmer nur mit Heißkleber an der Säule befestigt. Allerdings führte diese Art der Befestigung dazu, dass sich während der Haltephase bei Laststufe II Zwei der Befestigungselemente an den Wegaufnehmern ablösten. Für die Laststufe III mussten die Wegaufnehmer von neuem angeklebt werden. Somit existieren für die gesamte Versuchsdauer zwei getrennte Verformungsmessungen.

1. Messung (Laststufe I & II):



2. Messung (Laststufe III):

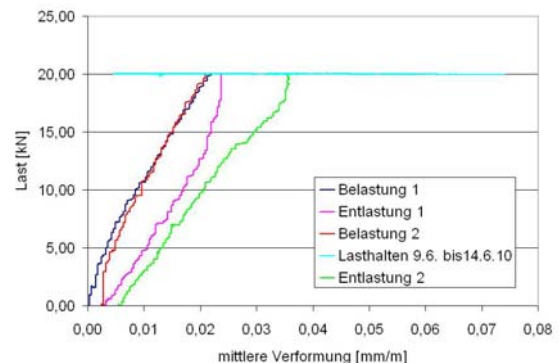


Abbildung 5: Anordnung der Wegaufnehmer; Verlauf der Verformung

Die erste Messung (siehe Abb.5, oben) zeigt die mittlere Verformung während der Belastung auf Laststufe I (7,0 kN), dem Halten dieser Last bzw. dem Entlasten und anschließendem Belasten auf Laststufe II (14,0 kN). Auffallend ist hier, dass während dem Halten auf Laststufe I eine irreversible Verformung von ca. 0,05 mm/m auftritt. Betrachtet



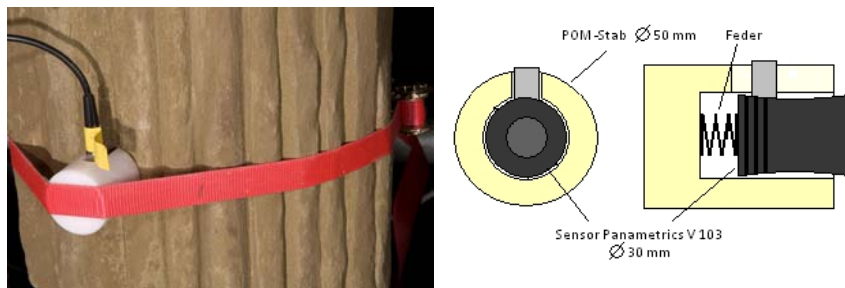
man die mittlere Verformung über die gesamte erste Messung, so ergibt sich eine kontinuierliche Zunahme der Verformungen. Diese irreversiblen Verformungen lassen grundsätzlich auf geringe Veränderungen in der Säule schließen.

Die zweite Messung (siehe Abb.5, links) zeigt den Verlauf beim mehrmaligen Be- und Entlasten der Säule auf Laststufe III bzw. das Halten dieser Laststufe über einen Zeitraum von 5 Tagen. Innerhalb dieser Zeit kam es aufgrund der heißen Witterung zu temperaturbedingten Schwankung der Verformung bei konstanter Last (siehe Abb.5, rechts), die nicht vollständig von der Temperaturkompensation aufgefangen werden konnte. Die dort gemessenen Werte können somit nur tendenziell betrachtet werden. Zwar ist nach der endgültigen Entlastung der Säule eine weitere leichte Zunahme der irreversiblen Verformung erkennbar, aber die genaue Größe ist unsicher (Größenordnung der irreversiblen Verformung bei Laststufe III ca. 10 % der Verformung bei Laststufen I&II).

Weiterhin auffallend ist, dass die Steigungen der Lastverformungskurven beim Be- und Entlasten bis auf Anfangseffekte zu Beginn der Lastwechsel ähnliche Verläufe zeigen. Dies lässt darauf schließen, dass sich die reversiblen bzw. die elastischen Eigenschaften der Säule nicht geändert haben. Die irreversiblen Anteile der Verformung beruhen vermutlich auf Setzungsprozessen, der aus mehreren Teilen zusammengesetzten Säule. Die größte irreversible Verformung erfolgt bei der Erstbelastung der Säule (Laststufe I&II), während bei weiteren Belastungen nur geringe Zusatzverformungen auftraten.

### 3.4 Schallemissionsanalyse

Für die Aufzeichnung von Schallemissionen während der Probelastung wurden über die gesamte Oberfläche der Säule acht breitbandige Sensoren (Typ: Panametrics V103) angebracht. Es wurden jeweils zwei Sensoren auf gegenüberliegenden Seiten voneinander angebracht. Sie bildeten jeweils eine der vier Ebenen (E1 – E4; siehe Abb.3). Angekoppelt wurden die Sensoren mit Heißkleber. Zusätzlich fixierte man sie über Spanngurte und eine eigens für diese Anwendung konstruierte Kunststoffführung (siehe Abb.6), mit deren Hilfe über die eingebauten Federn ein konstanter Anpressdruck des Sensorkopfes an die Oberfläche gewährleistet werden konnte.



**Abbildung 6:** Ankopplung der Schallsensoren

**Tabelle 1.** Aufgezeichnete Schallemissionen

Ereignisse	Max. F [kN]	Events	
		Σ	SE
Belastung auf Laststufe I	7,0	21	3
Belastung auf Laststufe II	14,0	13	1
Belastung auf Laststufe III	20,0	14	1
Wiederbelastung auf Laststufe III	20,0	19	0

Während der Belastung auf die Laststufen I bis III wurden jeweils die auftretenden Schallemissionen aufgezeichnet (siehe Tab.1). Bei den durchgeführten Aufzeichnungen traten neben einer Vielzahl von Störsignalen, die insbesondere auf die eingesetzte Maschinenteknik zurückzuführen sind, auch weitere Schallemissionen auf. Diese stellen

aufgrund ihrer Wellenform und ihrem Ausgangsort jedoch keine Bruchsignale dar. Vielmehr könnte es sich hierbei um Reibgeräusche aus dem Prüfraumen bzw. Setzgeräusche aus dem Fußbereich handeln. Die Anzahl der verwertbaren Schallereignisse lies sich auch durch eine erhöhte Sensorenempfindlichkeit nicht verbessern, da in gleichem Maße die Störsignale zunahmen.

### 3.5 Ultraschalltransmissionsanalyse

Ursprünglich war es geplant die Messungen für die Ultraschalltransmissionsanalyse für jede der vier Ebene (vgl. Abb. 3) einzeln durchzuführen. In Anlehnung an die Arbeiten von Wilhelm [4], [5] sollte einer der Sensoren als Sender, der andere als Empfänger des Ultraschallsignals dienen. Somit hätte man für jeden untersuchten Belastungszustand vier Messergebnisse in unterschiedlichen Höhen gehabt.

Jedoch zeigte sich bei ersten Voruntersuchungen, dass der starke Verwitterungszustand der Säule einen solchen Messaufbau nicht zulässt. Die Sendeenergie der eingesetzten Sensoren war nicht ausreichend um das geschädigte Material zu durchdringen. Deshalb wurde die Messanordnung abgeändert und ein zusätzlicher Ultraschallsender in Säulenmitte angebracht (siehe Abb.7). Die bereits bei der Schallemission eingesetzten Sensoren dienen hier ausschließlich als Empfänger des Transmissionssignals. Die Schallwege verlaufen ausgehend vom Sender zum jeweiligen Empfänger. (vgl. Abb.7 bzw. Tab.2)

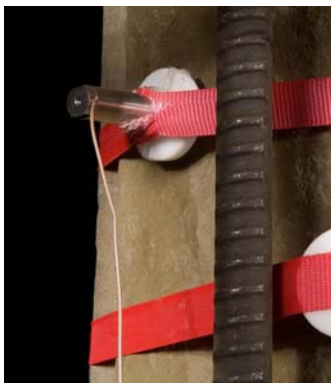
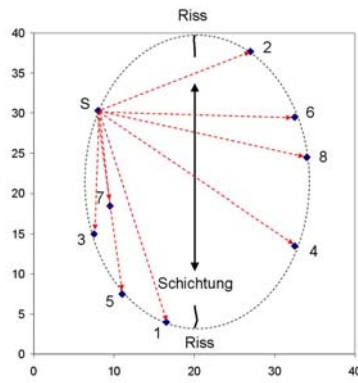


Abbildung 7: Sender- und Sensorpositionen (von oben)



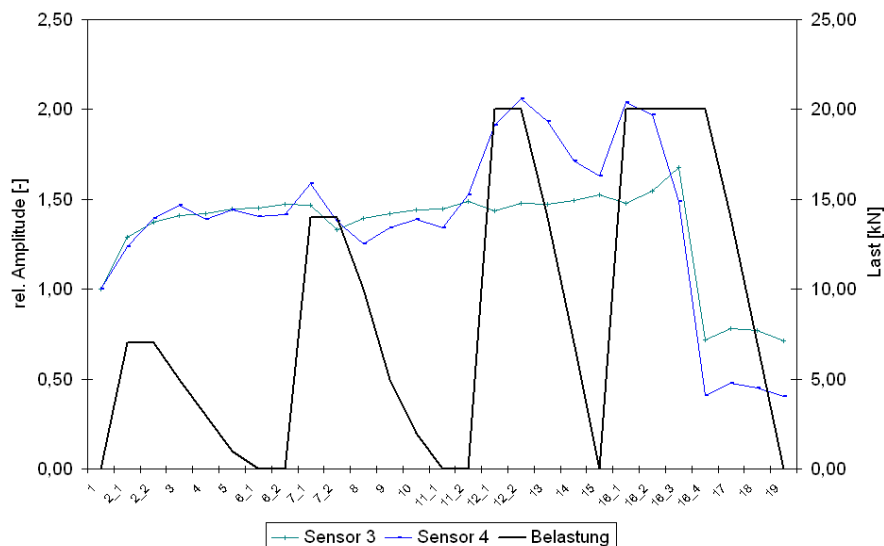
**Tabelle 2.** Wegstrecken  
Strecken s zwischen  
Ultraschallsender und ...  
[in cm]

Sensor 1	85,21
Sensor 2	84,40
Sensor 3	18,79
Sensor 4	31,31
Sensor 5	27,24
Sensor 6	27,94
Sensor 7	90,39
Sensor 8	92,04

Üblicherweise werden bei der Auswertung von Ultraschalluntersuchungen ausschließlich Phasenverschiebung bzw. Laufzeit der Signale ermittelt und diskutiert. Eine quantitative Auswertung der Amplitude ist eher unüblich. Dennoch haben Untersuchungen [6], [7] in den letzten Jahren gezeigt, dass die Amplitude viel intensiver auf Änderungen im Gefüge reagiert als beispielsweise die Laufzeit. Allerdings haben die Arbeiten von Wilhelm [4], [5] gezeigt, dass die Amplitude sowohl von den zu prüfenden Eigenschaften als auch unbekanntem Ankopplungsbedingungen abhängt. Gelingt es jedoch die Ankopplungsbedingungen während eines Belastungsversuches konstant zu halten, so sind Änderungen der Amplitude nur mit Änderungen im durchschallten Material zu begründen. Aus diesem Grund wurde beim Befestigen von Sender und Empfänger zusätzlich darauf geachtet, dass der Anpressdruck in etwa konstant gehalten wird.

### Analyse der Amplitude:

In der Regel ist bei der Analyse der Messergebnisse bezüglich der maximalen Amplitude des Signals bei Inhomogenitäten im Material eine Abschwächung des Signals zu erwarten. Bei der vorliegenden Säule ist bereits bekannt, dass in Säulenmitte durch die Instandsetzungen Inhomogenitäten zu erwarten sind. Unter Belastung und während der Haltephase der Last kann es deshalb zu Setzungsprozessen bzw. Aufgehen von Rissen kommen. Für die Sensoren auf der Senderseite (Sensoren 1, 3, 5 & 7) ist unter diesen Bedingungen eine Zunahme der Amplitude durch teilweise Reflexion des Signals bzw. kein Einfluss auf die Amplitudenintensität zu erwarten. Zeitgleich sollten die Messergebnisse bei den Sensoren auf der Senderabgewandten Seit (Sensoren 2, 4, 6 & 8) eine Abnahme der Amplitudenintensität aufweisen. Dieser theoretische Verlauf der Amplituden konnte durch die aufgezeichneten Signale allerdings nur bedingt bestätigt werden. Beispielhaft soll dies an der Ebene 2 gezeigt werden, welche sich aus den beiden Sensoren 3 und 4 zusammensetzt. Zu erkennen ist, dass sich die Amplitudenintensität von Sensor 3, der den geringsten Abstand zum Sender besitzt, durch die Probebelastung nur geringfügig ändert. Schädigungen bzw. Materialinhomogenitäten zwischen Sender und Empfänger sind auszuschließen. Bei Sensor 4 ist dagegen während der Haltephase bei Laststufe II eine Abnahme der Amplitude zu registrieren. Dies lässt zunächst auf Störungen im Ausbreitungsbereich des Signals schließen. Jedoch konnte während der ersten Haltephase bei Laststufe III eine Zunahme der Signalamplitude aufgezeichnet werden. Eine genaue Aussage über den Zustand des Materials zwischen Sender und Sensor 4 ist somit nicht möglich. Des Weiteren lässt die starke Abnahme der Intensität während der zweiten Haltephase bei Laststufe III, die bei allen acht Sensoren aufgetreten ist, darauf schließen, dass die Ankopplungsbedingungen während der Versuchsdauer doch nicht konstant gehalten werden konnten.



**Abbildung 8:** rel. Änderung der Amplitudenintensität für Ebene 2

### Analyse der Schallgeschwindigkeit:

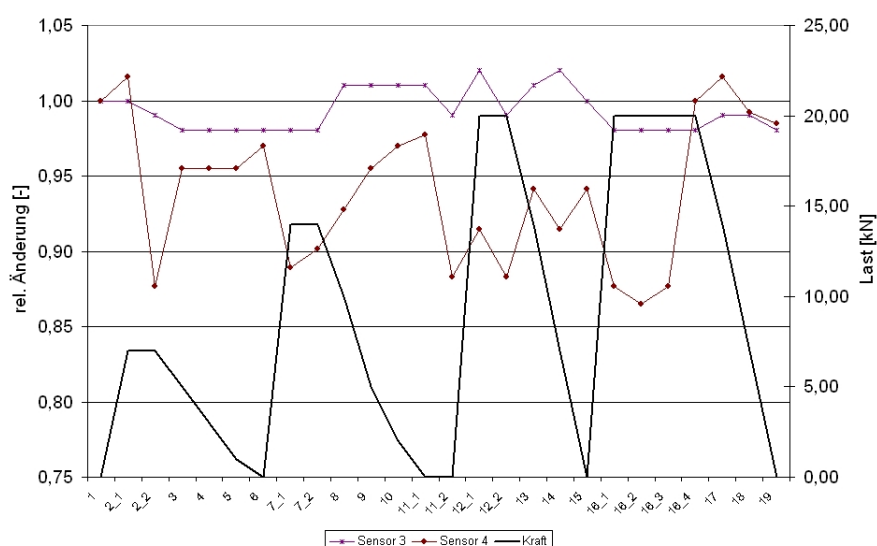
Neben der Schallabschwächung des Ultraschallsignals kann bei der Ultraschalltransmission auch die Schallgeschwindigkeit im Material zur Analyse der Ergebnisse herangezogen werden. Dazu sind sowohl die Laufzeiten als auch die Entfernungen zwischen Sender und Empfänger notwendig. Daraus kann dann relativ einfach die Schallgeschwindigkeit im untersuchten Material berechnet werden. Wie bereits andere Untersuchungen an Schilfsandstein, siehe [8], gezeigt haben, können große Veränderungen bei den Schallgeschwindigkeiten auf Materialinhomogenitäten bzw. Risse im Material hindeuten.

**Tabelle 3.** Schallgeschwindigkeiten [m/s]

Bruchfrisches Material	Sensoren 3 bis 6	Sensoren 1, 2, 7 und 8
1.800 – 2.200	380 – 520	900 – 1.200

In Tabelle 3 sind die jeweiligen Schallgeschwindigkeiten für die Sensoren und für bruchfrisches Material angegeben. Die niedrigen Werte aus der Mitte der Säule (Sensoren 3 bis 6) enthalten mehr Streckenanteile quer zur Schichtung, bzw. verlaufen in den am stärksten geschädigten Bereichen mit Verwitterungsverlusten, in denen die Säule in zwei Einzelteile zerbrochen war (d.h. es wird durch die Verfüllung gemessen). Die anderen Messstrecken (Sensoren 1, 2, 7 und 8) verlaufen stärker parallel zur Schichtung und zeigen deshalb höhere Werte. Dennoch ist es aufgrund des extremen Verwitterungszustands nicht möglich die Werte des bruchfrischen Materials zu erreichen.

Auch hier soll wieder beispielhaft an Ebene 2 die relative Änderung der Schallgeschwindigkeit über den Lastverlauf betrachtet werden (siehe Abb.9). Während sich die Schallgeschwindigkeit für Sensor 3 nur geringfügig ändert, ist bei Sensor 4 jeweils beim Maximum der drei Laststufen eine Abnahme der Schallgeschwindigkeit zu registrieren. Dies lässt auf eine längere Signallaufzeit zwischen Sender und Sensor schließen, was wiederum eine Öffnung eines Risses zur Folge haben kann. Die anschließende Entlastung der Säule hat hingegen eine erneute Zunahme der Schallgeschwindigkeit zur Folge (Schließen des Risses).

**Abbildung 9:** rel. Änderung der Schallgeschwindigkeit für Ebene 2

#### 4. Schlussfolgerungen

Generell ist bei der Untersuchungen von Bauteilen mit unbekanntem Zustand des Materials der Einsatz nur eines Prüfverfahrens meist nicht ausreichend bzw. sinnvoll. Vielmehr verbessert die sinnvolle Kombination mehrerer Prüfverfahren die Aussagefähigkeit des Messergebnisses. So zeigten die Ergebnisse aus der visuellen Rissbeobachtung, dass der neu aufgetretenen Riss im Fußbereich der Säule nur geringfügig anwächst, aber dennoch vor dem endgültigen Einbau der Säule zusätzlich gesichert werden sollte, was mit einer weiteren Edeltstahlgewindestange erfolgte [pers. Mitteilung des Restaurators Hr. Kürten]. Ebenfalls konnte in Säulenmitte anhand der Verformungsmessung mittels induktiver Wegaufnehmer festgestellt werden, dass es zu irreversiblen Verformungen kommt, welche sich vermutlich auf Setzungsprozesse in der Säule zurückführen lassen. Die Verformungen sind allerdings so gering, dass eine weitere Sicherung der Säule in diesem Bereich nicht nötig ist. Die Schallemissionsanalyse stieß bei den durchgeführten Untersuchungen an ihre



Grenzen. Bei den vorliegenden Abmessungen und dem Zustand der Probe bzw. den Umgebungsbedingungen (Maschinengeräusche) war ein sinnvoller Einsatz ohne übermäßigen Aufwand nicht möglich. Anders verhält es sich bei der Ultraschalltransmissionsanalyse. Hier zeigten sowohl die Ergebnisse aus der Amplitudenanalyse als auch die Ergebnisse aus der Schallgeschwindigkeitsanalyse, dass sich die Materialinhomogenitäten in der Mitte der Säule abzeichnen. Prinzipiell sind solche Messungen auch In-Situ möglich und können zusätzliche Informationen zu rein mechanischen Daten liefern (siehe [2]).

### **Danksagung:**

Diese Arbeit wurde von Vermögen und Bau Baden-Württemberg unterstützt. Hier danken wir insbesondere Frau Heuss-Mehlig und Herrn Kreissl von AeDis für die Betreuung. Herrn Prof. Burkhardt danken wir für die statische Beratung und dem Restaurator Herrn Kürten für die restauratorische Betreuung. Weiterhin danken wir den Kollegen Herrn. Dr. Stegmaier und Herrn Schuon aus der Abteilung „Mineralische Baustoffe“ für die Durchführung und Betreuung der Belastungsversuche.

### **Referenzen**

- [1] Eisele, G.; Gutermann, M.; Steffens, K.: *Tragsicherheitsbewertung von Kalksteinsäulen im Neuen Museum Berlin*, Berlin, Fachtagung Bauwerksdiagnose:Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen, 23.-24. Februar 2006.
- [2] Eilhardt-Braune, E.-M.; Götz, J.; Steffens, K.: *Die Michealiskirche in Hildesheim – Erhaltung des Weltkulturerbes*, Bautechnik 84, Heft 5, 2007.
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: *Richtlinie „Belastungsversuche an Betonbauwerken“*, Berlin, DAfStb, Beuth Verlag, 2000.
- [4] Wilhelm, T.: *Betongedächtnis – Ermittlung historischer Maximalspannungen im Betonquerschnitt*, Wien, 45. Forschungskolloquium des DAfStb, 2005.
- [5] Wilhelm, T.: *Ein experimentell begründetes mikromechanisches Modell zur Beschreibung von Bruchvorgängen in Beton bei äußerer Krafteinwirkung*, Darmstadt, Dissertation TU Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, 2006.
- [6] Klemt, K.: *The bearing and deformation performance of concrete subjected to compressive loading*, Darmstadt, Dissertation TU Darmstadt, Institut für Massivbau, 2001.
- [7] Nogueira, C.L.; Willam, K.J.: *Ultrasonic testing of damage in concrete under uniaxial compression*, ACI Materials Journal, Vol. 98, No. 3, 2001.
- [8] Ozbolt, J.; Grassegger, G.; Van der Veken, P.; Periskic, G.; Reinhardt, H.-W.: *Experimental and numerical study of hygro-thermo-mechanical properties of “Schilfsandstein” from Baden-Württemberg*, Environmental Geology, Vol. 56, No. 3-4, 2008.