

# Bestandserhaltung von Baudenkmalen durch Anwendung zerstörungsfreier Untersuchungs- und Modellierungsmethoden

Michael AURAS<sup>1</sup>, Ercan ERKUL<sup>2</sup>, Thomas MEIER<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz

<sup>2</sup>Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität, Kiel

**Kurzfassung.** Die Bestandserhaltung historischer Bauwerke bedarf gründlicher Voruntersuchung, Qualitätskontrolle und Bauwerksüberwachung, um die Eingriffe in die Denkmalsubstanz zu minimieren und Folgeschäden zu vermeiden. Zerstörungsfreie Prüfmethoden und numerische Modellierungsverfahren bieten heute bewährte und neue Möglichkeiten, gesicherte Kenntnisse über die Bauwerke und die altersbedingten Veränderungen ihrer Baumaterialien zu erzielen und gleichzeitig die Eingriffe für Materialentnahmen und Bauwerksöffnungen zu minimieren. Anhand von Fallbeispielen werden aktuelle Forschungsergebnisse präsentiert. Georadarmessungen werden mit theoretischen Modellierungen kombiniert, um gemessene Anomalien in Materialparametern zu begründen. Moderne Anforderungen wie die energetische Sanierung historischer Gebäude werfen neue Problemfelder auf, für die anhand von Modellierungen des Wärme- und Feuchtetransports Antworten gefunden werden. Die Weiterentwicklung von Ultraschallmesstechnik und Signalauswertung ermöglicht neue Anwendungen bei der Untersuchung verwitterter Sandsteinoberflächen mittels Rayleighwellen.



Projet cofinancé par le Fonds européen de développement régional dans  
du programme INTERREG IVA Grande Région  
*L'Union européenne investit dans votre avenir.*

Gefördert durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung im  
des Programms INTERREG IVA Großregion  
*Die Europäische Union investiert in Ihre Zukunft.*



## Einleitung

Zunehmend werden auch im Bereich der Baudenkmalpflege zerstörungsfreie bzw. zerstörungsarme Prüfmethode eingesetzt. Dies betrifft sowohl das Gebiet der Voruntersuchungen im Vorfeld von Restaurierungsmaßnahmen als auch den Bereich der Bauwerksüberwachung. Gründliche Voruntersuchungen ermöglichen eine detaillierte Maßnahmenplanung mit dem Ziel der größtmöglichen Schonung originaler Bausubstanz. Zudem ergibt sich für den Bauherrn eine höhere Sicherheit bezüglich der Kostenberechnung, da der Instandsetzungsaufwand genauer eingegrenzt werden kann. Ein Monitoring hingegen zielt auf die Früherkennung von Bauschäden, um durch frühzeitige Wartungs- und Reparaturarbeiten die Entwicklung gravierender Schäden zu verhindern bzw. zu verzögern.

Im Folgenden werden Fallbeispiele zur Anwendung zerstörungsfreier Prüfmethode und numerischer Modellierungsverfahren dargelegt. Innovative Entwicklungen im Bereich von Ultraschallmessungen werden aufgezeigt. Die Kombination von Messung und Modellierung erlaubt die gegenseitige Validierung und Optimierung der methodisch unterschiedlichen Ansätze.

### Untersuchung von Sandsteinsäulen mittels Georadar

An der romanischen Klosterkirche von Enkenbach-Alsenborn nahe Kaiserlautern wurden im Rahmen des Forschungsprojektes TOAST<sup>i</sup> Sandsteinsäulen durch die Universität Kiel mittels Georadar untersucht. Die Kirche wurde im 13. Jh. fertiggestellt und zeichnet sich durch hochwertige bildhauerische Bearbeitung der Kapitelle und Portale aus. Sie liegt in einer Flussaue und zeigt starke Substanzschäden durch aufsteigende Feuchte und damit verbundene Salzbelastungen. Als Baumaterial wurde eine lokale Varietät des Unteren Buntsandsteins von mittlerer Porosität (12 Vol.-%) und Druckfestigkeit (40 – 45 N/mm<sup>2</sup>) verwendet. Zur Beurteilung von interner Struktur und Oberflächenschäden wurden Messungen mittels Georadar, Infrarot und Ultraschall durchgeführt. An dieser Stelle soll exemplarisch die Kombination von Radarmessung an einer Sandsteinsäule mit einer Modellierung der Wellenausbreitung vorgestellt werden [1].

Bei der Messung durchdringen Radarwellen die Baukonstruktion. Sie werden an Grenzflächen zwischen Materialien unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften reflektiert und an der Oberfläche wieder aufgezeichnet. Mit einer 1,6 GHz Antenne wurden Vertikalprofile von 2 m Länge im Abstand von 5 cm aufgenommen (Abb. 1a). Die Messergebnisse können als Zeitscheibe (Abb. 1b) oder als Radargramm (Abb. 1c, 1d) dargestellt werden, wobei die gemessenen Reflexionsamplituden als Graustufen dargestellt sind. In den Radargrammen sind die Messungen entlang der Profile P 9 und P 21 dargestellt. Hier zeichnen sich die Reflexionen an der Vorderseite (bei ca. 1 ns) und an der Rückseite der Säule deutlich ab. Das Rückwandecho liegt im unteren Teil der Säule (linke Seite der Radargramme) bei ca. 10 ns und – da sich die Säule nach oben hin verzünigt – bei ca. 8 ns im oberen Teil (bzw. auf der rechten Seite der Radargramme). Die Markierungen C 1 und C 2 zeigen die Lage der Fugen zwischen den einzelnen Säulentrommeln an. Die roten Linien geben die Lage der Messprofile P 9 und P 21 an.

In den Messungen zeigen sich zwei Anomalien. Der grün unterlegte Bereich B markiert eine starke horizontale Reflexion, die in der Zeitscheibe (Abb. 1 b) und im Radargramm des Profils P 9 (Abb. 1 c) erkennbar ist. Sie ist über mehrere Profile erkennbar, liegt in ca. 15 cm Tiefe und ist ca. 40 cm lang und 7 cm hoch. Es dürfte sich um einen festen Einschluss oder einen Riss handeln.

Im blau unterlegten Bereich A zeigt das Rückwandecho eine geringere Amplitude als in den höheren Bereichen der Säule. Dies deutet auf eine höhere elektrische Leitfähigkeit in diesem Bereich, bedingt vermutlich durch lokal erhöhte Salz- oder Feuchtegehalte. Erhöhte Feuchtegehalte würden ebenfalls die elektrische Leitfähigkeit erhöhen, aber gleichzeitig zu einem Anstieg der Dielektrizitätskonstanten führen. Die Bauakten geben an, dass unterhalb des jetzigen Bodenniveaus im Bereich der Säulenbasen eine Horizontalsperre eingebaut wurde. Dadurch wird das Aufsteigen der Feuchtigkeit in die Säulen wirkungsvoll unterbunden. Messungen der Salzbelastung in der untersuchten Säule belegen erhöhte Salzgehalte im unteren Bereich [2], was mit den Ergebnissen der Radarmessungen übereinstimmt. Es ist also anzunehmen, dass früher durch aufsteigende Feuchte Salze in die unteren Bereiche der Säule transportiert wurden. Nach

dem Einbau der Horizontalsperre in die Säulenbasis trocknete der Sandstein, die Salze blieben jedoch im Sandstein zurück.

Mittels 2-D Modellierung wurde die Wellenausbreitung in der Säule berechnet (Abb. 2). Die Säule wird modelliert als horizontale Sandsteinschicht mit abnehmender Dicke, unterlagert von Luft. Das resultierende synthetische Radargramm (Abb. 2b) zeigt das Rückwandecho zur gleichen Zeit wie die Messdaten. Die zweite Reflexion bei ca. 12 ns in den Messdaten tritt im synthetischen Radargramm nicht auf. Dabei dürfte es sich um einen 3-D Effekt handeln, der in 2-D nicht modelliert werden kann. Vermutlich ist er auf mehrfache Reflexionen an den Seitenwänden der Säule zurückzuführen. Die Abbildungen 2c bis 2e zeigen die berechnete Wellenausbreitung zu verschiedenen Zeiten. Anfangs breiten sich die Wellen kreisförmig vom Ursprungsort ausgehend aus (Abb. 2c). Nach ca. 5,5 ns erreichen sie die Rückwand und werden reflektiert. Dies entspricht der Reflexion, die in den gemessenen Radargrammen bei 10 ns zu sehen ist. Bei erhöhtem Feuchtegehalt müsste bei der Modellierung ein höherer Wert für die Dielektrizitätskonstante eingesetzt werden, was aber zu schlechter Übereinstimmung mit den gemessenen Radargrammen führt. Daher kann auch aufgrund der Modellierungsergebnisse ein erhöhter Feuchtegehalt im unteren Säulenabschnitt ausgeschlossen werden. Um den Dämpfungseffekt infolge erhöhter Salzbelastung zu modellieren, wurde im unteren Bereich der Säule die elektrische Leitfähigkeit linear von 0,05 auf 0,005 mS/m abgesenkt (Abb. 2a), wodurch eine gute Übereinstimmung von Messdaten und Modellierung erzielt wird.

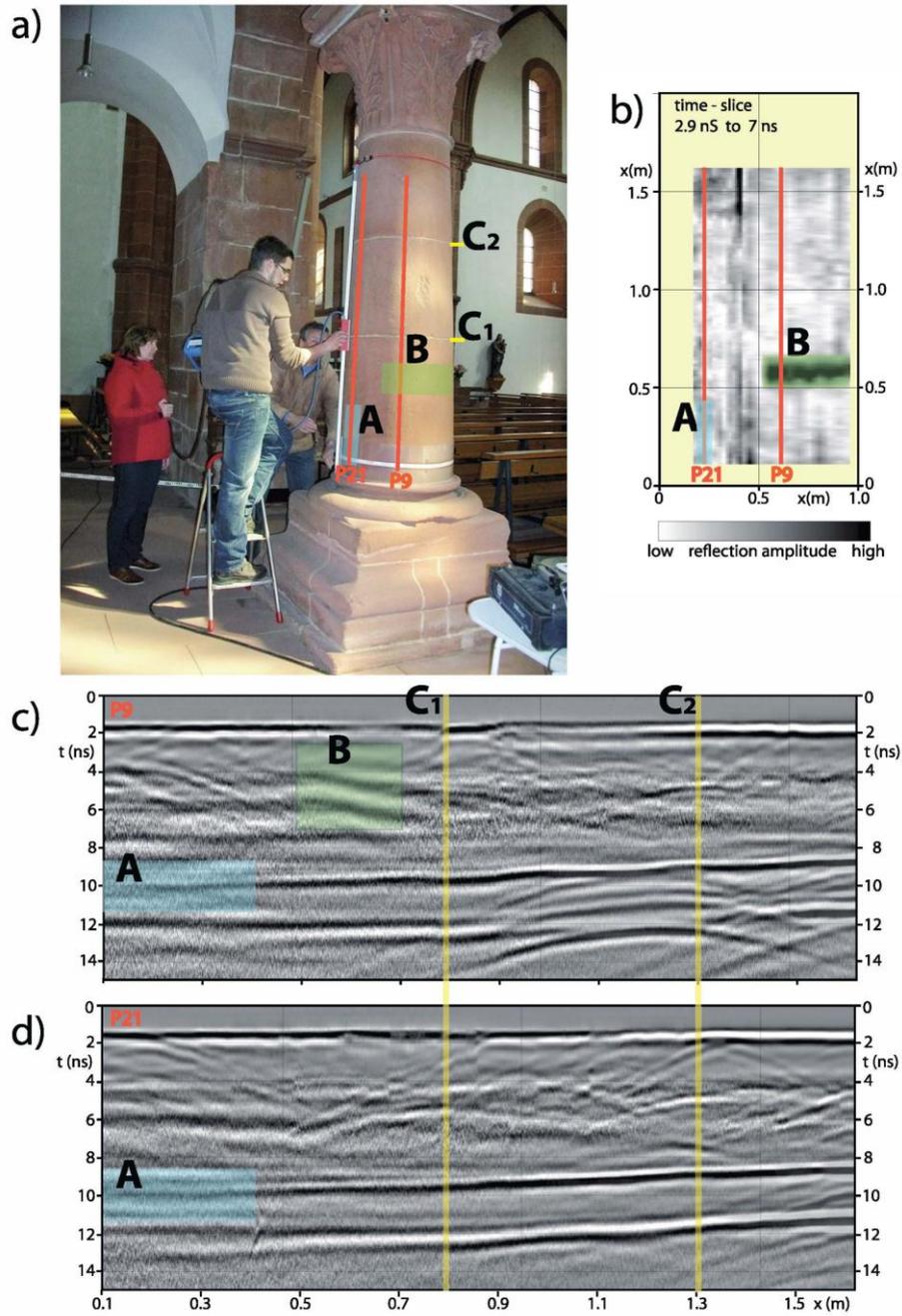


Abb. 1: Georadarmessungen an einer Sandsteinsäule in der Kirche Enkenbach a) Profilmessung; b) Zeitscheibe 2,9 – 7 ns; c) Radargramm von Profil P 9; d) Radargramm P 21 [1]

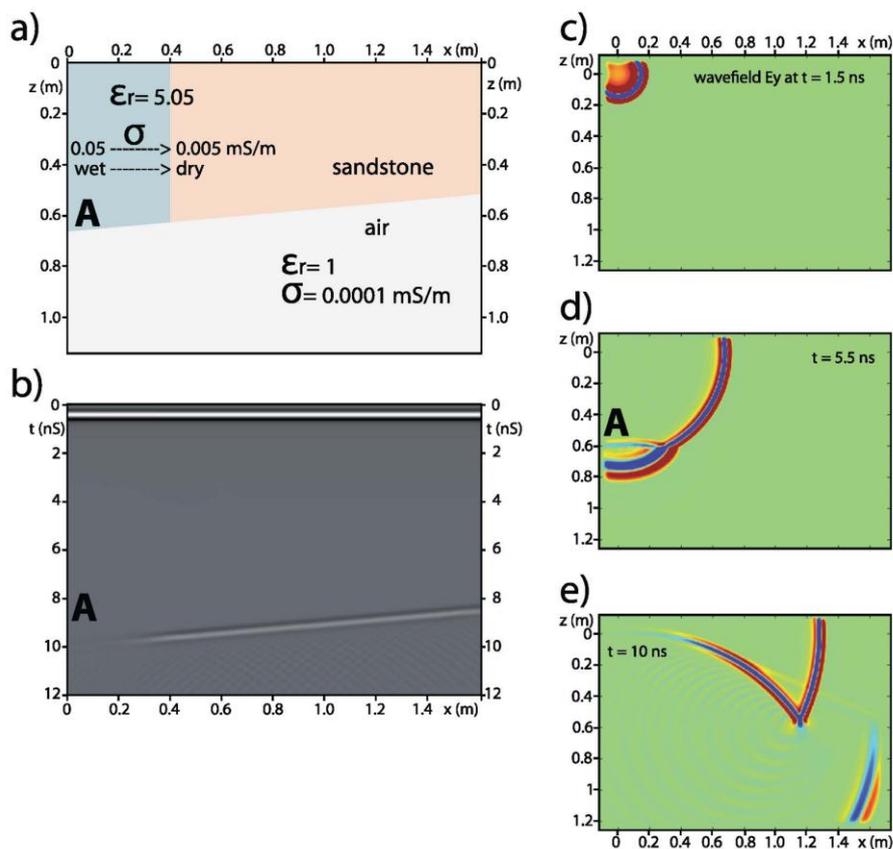


Abb. 2: Modellierung der Ausbreitung von Radarwellen in der Sandsteinsäule a) Modell; b) berechnetes Radargramm; c) Wellenausbreitung nach 1,5 ns; d) nach 5,5 ns; e) nach 10ns [1]

### Feuchtemonitoring und Modellierung des Feuchte- und Wärmetransportes zur Kontrolle einer Innendämmung ohne Fassadenhydrophobierung

Der Einbau einer Innendämmung in Bestandsgebäude setzt eine schlagregendichte Fassade voraus [3]. Hauptquelle von Feuchtigkeit innerhalb einer Außenwand ist in den meisten Fällen Schlagregen, der Kapillartransport von der Oberfläche in das Innere der Mauer eindringt. Daneben kann es bei Taupunktunterschreitung im Wandquerschnitt zur Kondensation von Wasser aus der Dampfphase kommen. Wärmezufuhr durch Heizen auf der Raumseite der Wand unterstützt die Trocknung. Wird nun eine Innendämmung eingebaut, ist der Wärmefluss von der Raumseite durch den Wandquerschnitt in Richtung Wandaußenseite stark reduziert. Dies verringert die Trocknungsgeschwindigkeit der Wand, weshalb sich unter Umständen Feuchte allmählich in der Wand akkumulieren kann. Aus diesen Überlegungen und vielen Modellrechnungen folgert die Forderung nach Schlagregendichtigkeit der Fassade, um den Feuchteeintrag zu vermindern und Feuchteakkumulation in der Wand zu vermeiden.

Dieser Forderung gegenüber stehen historische, oft denkmalgeschützte Baukonstruktionen mit Fassaden aus saugfähigen Materialien, die nicht schlagregendicht sind und bislang in bauphysikalischer Hinsicht problemlos funktionierten. Müssen diese nun wasserabweisend oder wasserhemmend ausgerüstet werden, um eine Innendämmung zu ermöglichen? Diese Frage wurde am Fallbeispiel des ehemaligen Trafohauses in Bischofsheim untersucht [4]. Das denkmalgeschützte Gebäude hatte seine ursprüngliche Nutzung verloren, weshalb eine Umnutzung zu einem Vereinszentrum vorgenommen wurde. Als Teilaspekt der Instandsetzungs- und Renovierungsarbeiten war eine energetische Ertüchtigung geplant.

Zunächst vorgesehen war eine Generalsanierung aller Fassaden mit gründlicher Reinigung, Ausräumen der Fugen und vollständiger Neuverfugung, Austausch auch gering geschädigter Ziegelsteine, Schließen von Rissen in den Steinoberflächen und abschließender Hydrophobierung aller Außenwandoberflächen. Damit wäre die Schlagregenaufnahme der Fassade auf ein zulässiges

Maß reduziert und die Dämmmaßnahme könnte schadensfrei vorgenommen werden. Dieses Vorgehen steht jedoch im Widerspruch zu der denkmalpflegerischen Grundforderung nach geringstmöglichen Eingriffen in die Denkmalsubstanz, da die vorbereitenden Maßnahmen mit massiven Eingriffen in die Originalsubstanz verbunden sind. Außerdem lässt die Wirksamkeit hydrophobierender Imprägnierungen im Lauf der Zeit nach, was zu gravierenden Folgeschäden führen kann [5], [6] und eine regelmäßige Überprüfung der hydrophoben Wirkung erfordert. Im vorliegenden Fall wurde vorgeschlagen, zunächst auf Fugenerneuerung und Hydrophobierung zu verzichten und stattdessen ein einfaches Monitoring der Feuchtebelastung der Außenwände durchzuführen. Zunächst wurde auf Bohrkernproben zur Bestimmung der Feuchtegehalte im Mauerquerschnitt zurückgegriffen. Diese sollten in jährlichem Turnus jeweils am Ende der Winterperiode im Bereich von Fugenkreuzen entnommen werden, um zu prüfen, ob es im Lauf der Zeit zur Feuchteakkumulation im Mauerwerk in der Nähe zur Innendämmschicht kommt. Sollte es zu einem kontinuierlichen Anstieg der Feuchtebelastung kommen, können Fugenerneuerung und Hydrophobierung nachgeholt werden. Die vorliegende Kombination von innenliegender Dämmung, einschaliger unverputzter Ziegelwand und Verzicht auf schlagregenreduzierende Maßnahmen ist aus bauphysikalischer Sicht sehr ungünstig. Dennoch zeigen die Ergebnisse der Feuchtemessungen, dass es zumindest in der ersten Zeit zu keiner Feuchteakkumulation im Wandquerschnitt kommt (Abb. 3). Um diese Messreihen mit zerstörenden Eingriffen nicht fortsetzen zu müssen, wurden zwischenzeitlich zwei Elektroden zur Messung des elektrischen Widerstandes im Tiefenprofil eingebaut, es liegen jedoch noch keine belastbaren Ergebnisse vor.

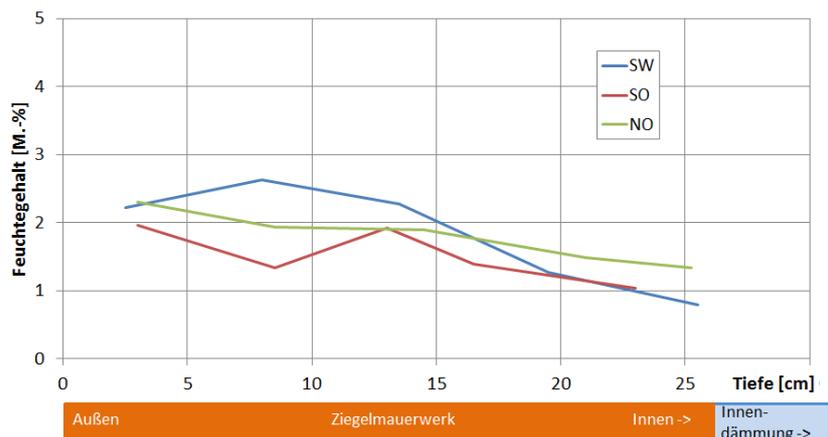


Abb. 3: Gemessene Feuchtebelastung im Wandquerschnitt in Abhängigkeit von der Orientierung, ein Jahr nach Einbau der Innendämmung

Begleitend wurden Simulationsrechnungen des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports nach aktuellen WTA Merkblättern durchgeführt [7], [8]. Die Berechnungen wurden mit der aktuellen Version des Programms WUFI des Fraunhofer Instituts für Bauphysik vorgenommen. In Abbildung 4 ist der berechnete Gesamtwassergehalt der Konstruktion für die ersten 3 Jahre der Simulation dargestellt. Die Berechnungen zeigen, dass einerseits die Nordseite einen höheren mittleren Wassergehalt im Vergleich zur Südseite des Gebäudes aufweist, andererseits jedoch die höheren Spitzenbelastungen in Folge von Schlagregenereignissen auf der Südfassade festzustellen sind. Gleichzeitig ist aus Abbildung 4 ersichtlich, dass unabhängig der Orientierung ein Austrocknungsprozess ausgehend von den üblicherweise angesetzten Anfangsbedingungen 20°C und 80 % r. F. einsetzt. Eine stetige Befeuchtung ist für diese Konstruktion bei den klimatischen Randbedingungen nicht zu erwarten. Auf Basis der Simulation erscheint diese Dämm-Maßnahme aus feuchtetechnischer Sicht unkritisch. Ursache ist vor allem die klimatisch günstige Situation (geringe Regenbelastung bei hoher mittlerer Jahrestemperatur), so dass gegebenenfalls eingedrungenes Regenwasser relativ rasch abtrocknen kann. Allerdings kann eine Simulationsrechnung nur so genau sein kann, wie die Kenndaten auf denen diese

Berechnung basiert. Sinnvoll ist daher die Überprüfung durch die Messungen des Feuchtegehaltes (Abb. 3).

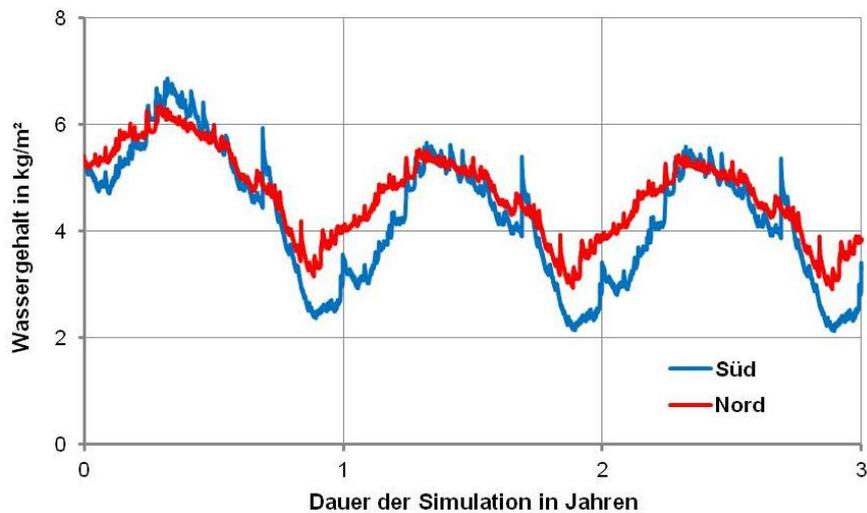


Abb. 4: Berechneter Gesamtwassergehalt der innengedämmten Wand für die Süd- und Nordausrichtung [4]

Die vorgestellte Lösung bringt dem Bauherrn eine Kostenreduzierung durch Minderung des Maßnahmenumfangs und Einsparung von Heizenergie. Der Denkmalpflege kommt die Maximierung des Substanzerhalts durch den Verzicht auf den Austausch der Fugen und der Erhalt der originalen Ziegeloberfläche durch das Vermeiden des Zuschlammens von Rissen entgegen. Für beide Parteien vorteilhaft ist der Verzicht auf eine Hydrophobierung mit ungewissen Nachwirkungen und unbekanntem Kontroll- bzw. Nachsorgeaufwand. Das vorgestellte Fallbeispiel zeigt auch, dass manche historische Baukonstruktion robust genug ist, eine Innendämmung zu ertragen ohne die Eigenschaften der historischen Baustoffe drastisch verändern zu müssen.

#### **Ultraschallmessungen zur Detektion oberflächennaher Verwitterungsschäden an Sandsteinen**

Die Porta Nigra in Trier ist das besterhaltene Stadttor aus römischer Zeit nördlich der Alpen, sie gehört bereits seit 1986 zum UNESCO-Weltkulturerbe. Der Name Porta Nigra ist seit dem Mittelalter überliefert und belegt, dass die Oberflächen des hellen Bausandsteins schon seit langem verschwärzt sind. Die dunkle Färbung ist zum Teil auf Mobilisation von Eisenverbindungen aus dem Sandstein und deren Transport an die Steinoberfläche zurückzuführen, zum Teil auf Ablagerungen von Ruß, mineralischem Staub und Luftschadstoffen. Durch diese Ablagerungen wird der Porenraum der Steinoberfläche teilweise verschlossen, die Steinoberfläche wird härter und dichter als das Substrat. Von vielen Untersuchungen an anderen Steindenkmälern ist bekannt, dass diese Verdichtung zu Langzeitschäden führen kann, wenn sich unter der verdichteten Oberfläche eine Mürbzone ausbildet, die zum Verlust der originalen Steinoberfläche führen kann [9]. Damit gehen Details der steinmetzmäßigen Bearbeitung der Oberflächen unrettbar verloren. Üblicherweise werden deshalb derartig verschmutzte Steinoberflächen gereinigt, um die weitere Schadensentwicklung zu vermeiden bzw. zu verlangsamen [10]. Dies ist jedoch im Fall der Porta Nigra problematisch, da eine Steinreinigung den Namen des Denkmals konterkarieren würde.

An der Porta Nigra sind Abplatzungen der schwarzen Krusten glücklicherweise bislang nur an relativ wenigen Stellen zu beobachten. Dies ist vermutlich vor allem auf die letzte Instandsetzungsmaßnahme Ende der 1960er Jahre zurückzuführen, bei der viel verwitterte Steinsubstanz ausgetauscht wurde. Auch wurde damals die konstruktive Wasserführung deutlich verbessert, sodass sich die Neuentwicklung von Steinschäden deutlich verlangsamt.

Die Frühstadien einer Steinschädigung unter den Krusten sind makroskopisch nicht zu erkennen. Falls diese bereits eingesetzt hat, könnte eine sehr zurückhaltende partielle Reinigung, eventuell in Verbindung mit einer Steinfestigung, die weitere Schadensentwicklung aufhalten oder

zumindest deutlich verlangsamen. Zur Beurteilung des Gefüges wurden an ausgewählten Sandsteinoberflächen der Porta Nigra im Rahmen eines Forschungsprojektes<sup>ii</sup> Ultraschallmessungen durch die Universität Kiel durchgeführt. Üblicherweise werden Ultraschallmessungen an Natursteinen im Transmissionsverfahren durchgeführt und lediglich die Geschwindigkeiten der Longitudinalwellen (P-Wellen) ausgewertet. Signalgeber und –empfänger werden dabei auf gegenüberliegenden Seiten eines Steinblockes oder eines Teils einer Skulptur platziert. Die gemessene Ultraschallgeschwindigkeit integriert über die gesamte Messstrecke, sodass verwitterungsbedingte Auflockerungen im oberflächennahen Bereich nur schwer erkennbar sind.

Im vorliegenden Fall wurden daher vor allem Rayleighwellen ausgewertet, die entlang der Steinoberfläche laufen und deren Eindringtiefe in den Stein frequenzabhängig ist und zwischen wenigen Millimetern und einigen Zentimetern variiert. Eine breitbandige Anregung und eine Signalauswertung mittels Frequenzanalyse [11] ermöglichen die Ableitung eines Tiefenprofils, das Aussagen über Auflockerungs- oder Verfestigungszonen im Bereich einiger Zentimeter unterhalb der Oberfläche ermöglichen. Hierzu wurden Profilmessungen durchgeführt, bei denen Geber und Empfänger im Abstand von 5 cm auf die Steinoberfläche aufgesetzt wurden. Nach der Aufzeichnung des ersten Signals wurde der Geber belassen und der Empfänger um weitere 0,5 bis 2 cm versetzt. Dies wurde mehrfach wiederholt, je Messstelle wurden Profile aus 10 bis 15 Einzelmessungen zusammengestellt. Daraus wurde die Gruppengeschwindigkeit der Rayleighwelle bestimmt. Eine Abnahme der Gruppengeschwindigkeit mit steigender Frequenz deutet auf oberflächennahe Auflockerung hin während eine Zunahme der Gruppengeschwindigkeit mit der Frequenz auf eine oberflächennahe Verdichtung des Materials hinweist. Somit können eine Schichtung und Veränderungen des Steingefüges mit der Tiefe erkannt werden

Für die Messungen wurden mittels einer manuellen Ankoppelvorrichtung breitbandige Ultraschallprüfköpfe (20 – 300 kHz) mit geringem, konstantem Anpressdruck auf die Oberfläche aufgesetzt. Die Prüfköpfe besitzen eine Tastspitze von nur ca. 2 mm Durchmesser und ermöglichen dadurch punktgenaue, reproduzierbare Messungen ohne Verwendung eines Koppelmittels. Die Abbildungen 5 – 7 zeigen beispielhaft einige Ergebnisse. In Abbildung 5 sind die Ergebnisse dargestellt, die an einem mittelalterlichen Sandsteinquader der Porta Nigra mit geringer Verschmutzung und intaktem Gefüge ermittelt wurden. Unten rechts sind die Einzelmessungen des Profils aufgezeichnet, auf der linken Seite die Auswertung für eine Einzelmessung aus diesem Profil. Links unten ist das farbige Zeit-Frequenz-Diagramm, rechts daneben frequenzabhängig die Amplitude und ein Qualitätsmaß für die Bestimmung der Rayleighgruppengeschwindigkeit. Darüber wiederum ist mit roter Linie die Geschwindigkeit für die einzelnen Frequenzen angegeben. Diese Linie zeigt, dass die Geschwindigkeit der Rayleighwelle von hohen Frequenzen (oberflächennah) zu tieferen Frequenzen (höhere Eindringtiefe) geringfügig ansteigt. Dies zeigt eine geringfügige oberflächennahe Auflockerung des Sandsteingefüges an.

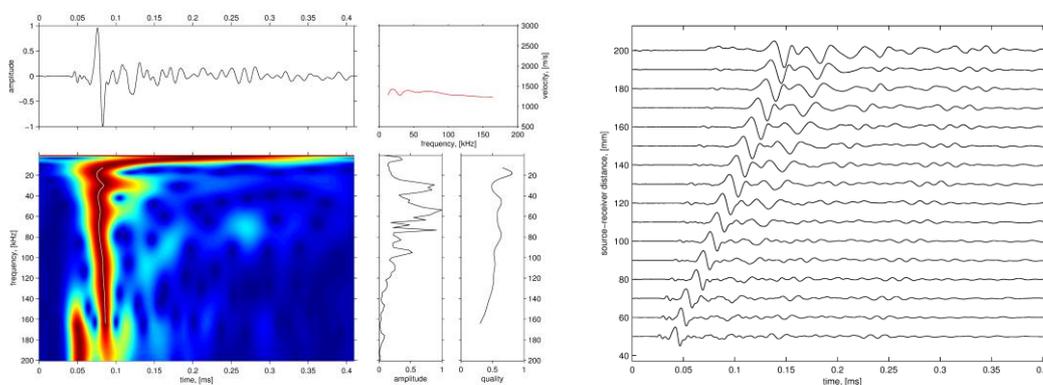


Abb.5: Ultraschallmessung an einem nur gering verwitterten Sandstein

In Abbildung 6 zeigt die rote Linie im Frequenz-Geschwindigkeit-Diagramm von hohen zu niedrigen Frequenzen sinkende Geschwindigkeiten an. Dies belegt eine Verdichtung im oberflächennahen Bereich infolge der Krustenbildung. Die Ultraschallgeschwindigkeiten sind im Vergleich zur ersten Messstelle stark reduziert, die Amplituden der hohen Frequenzen sind stark gedämpft (s. Amplituden-Frequenz-Diagramm unten Mitte).

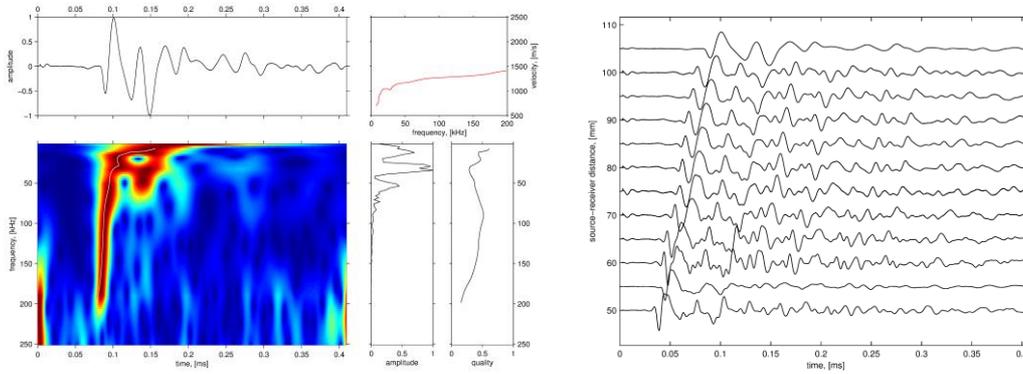


Abb. 6: Messergebnis an einem römischen Sandsteinquader mit schwarzer Kruste

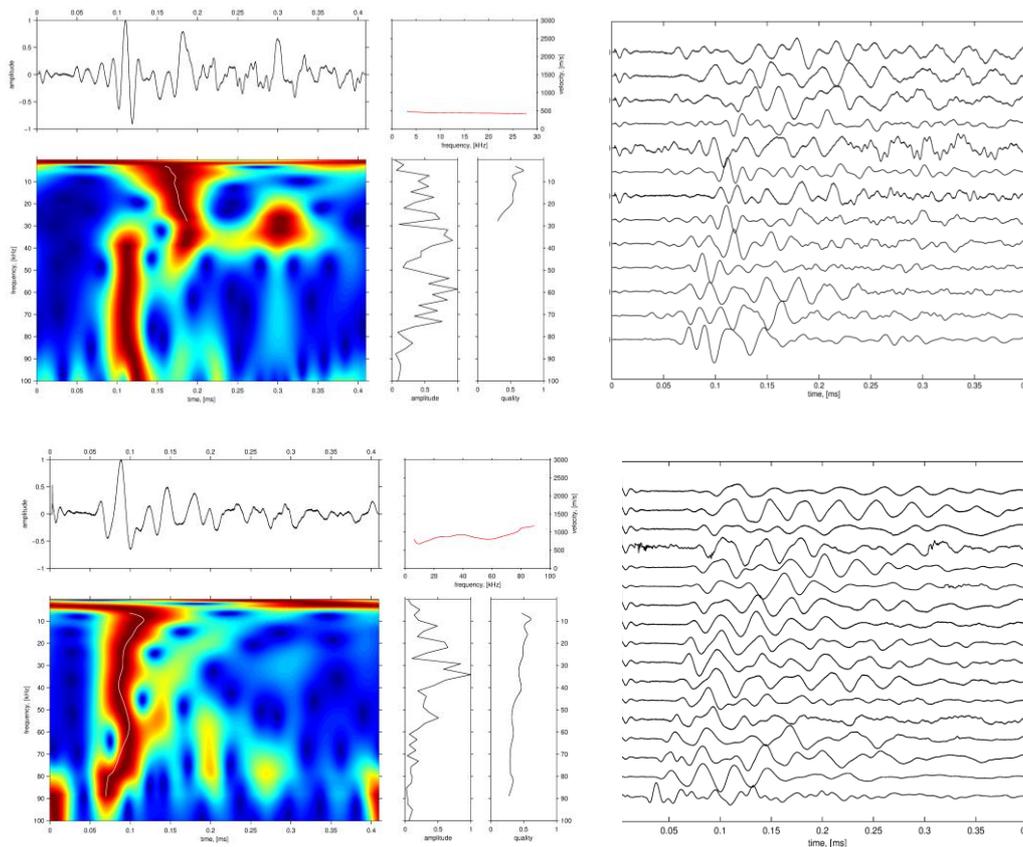


Abb. 7: Ultraschallmessungen an einem stark verwitterten Sandsteinquader vor (oben) und nach einer Steinfestigung (unten)

Im letzten Beispiel wurde eine stark verwitterte Sandsteinoberfläche untersucht (Abb. 7 oben). In den Profilmessungen zeigen sich unregelmäßige Wellenformen, bei denen teilweise die Einsätze von P- und Rayleighwelle nicht mehr erkennbar sind. Auch das Zeit-Frequenz-Diagramm ist sehr stark aufgeweitet. Die Ultraschallgeschwindigkeiten liegen mit Werten um 500 m/s auf extrem niedrigem Niveau. Die Stelle wurde nach Durchführung einer Steinfestigung mit Kieselsäureester nochmals gemessen (Abb. 7 unten). Nun wird der Welleneinsatz deutlicher erkennbar, die

Ultraschallgeschwindigkeit ist zumindest im oberflächennahen Bereich deutlich angehoben. Sie sinkt jedoch bei niedrigeren Frequenzen deutlich ab, was darauf hinweist, dass das Festigungsmittel im oberflächennahen Bereich eine Verfestigung bewirkt hat.

Aus den Messungen an der Porta Nigra und an anderen Objekten ist erkennbar, dass mit der Messung von Ultraschall-Oberflächenwellen, der oberflächennahe Bereich von ca. 2 cm zerstörungsfrei untersucht werden kann. Dieser Bereich ist besonders wichtig, da er besonders von der Sandsteinverwitterung betroffen ist. Die Analyse der Frequenzabhängigkeit der Rayleigh-Wellenausbreitung ermöglicht, Änderungen der Ausbreitungsgeschwindigkeit elastischer Wellen tiefenabhängig zu detektieren und abzuschätzen. Daraus können Schlussfolgerungen über Krustenbildung und eventuell vorhandene Ent- oder Verfestigung gezogen werden.

Die Schadensbilder und demzufolge auch die registrierten Wellenformen zeigen eine hohe Variabilität. Anhand der Frequenzabhängigkeit der Rayleigh-Welle können jedoch typische Schadensbilder und die dazugehörigen Änderungen der Geschwindigkeit mit der Tiefe unterschieden werden:

- Intaktes Gestein weist Rayleigh-Wellenformen mit geringer Dispersion und Dämpfung auf. Die Geschwindigkeit der Rayleigh-Welle liegt frequenzunabhängig bei ca. 1300 m/s bis 1400 m/s.
- In hellen und zurückgewitterten Bereichen sind die Geschwindigkeiten meist oberflächennah (einige Millimeter bis zu einem Zentimeter) verringert. Das deutet auf oberflächennahe Entfestigung hin. Die Gruppengeschwindigkeiten der Rayleighgrundmode können bei hohen Frequenzen bis auf 1000 m/s verringert sein.
- Stark absandende Bereiche weisen z.T. drastische Entfestigung der obersten Zentimeter auf. Der lose Kornverband wird durch sehr geringe Geschwindigkeiten der Rayleigh-Wellen angedeutet. Die Geschwindigkeiten der Rayleigh-Welle können auf 500 m/s sinken. Die Wellenformen sind oft einfach und es tritt starke Dämpfung auf.
- Schwarze Krusten sind eher mit einer Erhöhung der Geschwindigkeit auf 1500 m/s bis 2000 m/s verbunden, das Tiefenprofil kann aber sehr variabel sein. Die Krusten können homogen sein, dann treten einfache Wellenformen und geringe Änderungen der Geschwindigkeit mit der Frequenz auf. Sie können aber auch oberflächlich zunehmend verfestigt sein, dann steigt die Gruppengeschwindigkeit mit zunehmender Frequenz an. In anderen Fällen kommt es zu einer oberflächlichen Entfestigung der Kruste, die sich durch Abnahme der Geschwindigkeit mit zunehmender Frequenz äußert. Die Geschwindigkeiten können dann auf ca. 1200 m/s sinken. In diesen Fällen treten in 5 mm bis 1 cm Tiefe höhere Geschwindigkeiten auf, die oberflächennah reduziert sind.
- Sich ablösende Krusten und Schalen können noch niedrigere Geschwindigkeiten aufweisen und mit sehr komplizierten Wellenformen verbunden sein.

### **Schlussfolgerungen**

Die vorgestellten Beispiele zeigen stichpunktartig, wie die Untersuchung historischer Bausubstanz im Zusammenhang mit Restaurierungsmaßnahmen oder Monitoring von der Anwendung zerstörungsfreier Prüfmethode und numerischer Modellierungsmethoden profitieren kann. Für verschiedenste Fragestellungen bietet sich ein breites Anwendungsspektrum von ZfP-Methoden und Modellierungsverfahren. Gerade am historischen Bau ist die Entnahme von Materialproben für Laboruntersuchung problematisch, weshalb zerstörungsfreie bzw. zerstörungsarme Prüfmethode oder die Anwendung zu bevorzugen sind. In vielen Fällen benötigen sie zur Verifizierung die Anwendung zerstörender Prüfmethode, doch kann die Anzahl von Probenentnahmen meist durch die vorherige zerstörungsfreie Untersuchung minimiert werden, da sich kritische Bereiche besser vorab lokalisieren lassen.

In den genannten Beispielen Enkenbach und Trier wurden zerstörungsfreie Prüfmethode zur Schadensdiagnose (Enkenbach, Trier) und zur Qualitätskontrolle (Steinfestigung Trier) eingesetzt. Die Anwendung von Modellierungen kann helfen, kritische Bauteile oder Belastungssituationen zu erkennen. Die Kombination von Messung und Modellierung kann Ergebnisse gegenseitig absichern (Beispiel Bischofsheim) und die Interpretation von Messwerten

verifizieren (Enkenbach). Bei der Anwendung von Ultraschall ermöglichen die aufgezeigten Weiterentwicklungen von Messtechnik und Signalinterpretation neue Anwendungen wie die Messung von Rayleighwellen zur Beurteilung von Verwitterungsintensitäten und Festigungsmaßnahmen an Sandsteinoberflächen.

### Dank

Die Autoren danken dem Programm Geotechnologien von Bundesministerium für Bildung und Forschung und Deutscher Forschungsgemeinschaft sowie der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für finanzielle Förderung. Bei den Bauherren bzw. Bauherrenvertretern der genannten Denkmalobjekte sowie den zuständigen Denkmalbehörden bedanken wir uns für ihr Einverständnis und für logistische Unterstützung bei der Durchführung der Messungen. Anatol Worch sei für die Modellierungen des Feuchte- und Wärmetransports zum Beispiel Bischofsheim gedankt. Und natürlich gilt besonderer Dank Manfred Wenk und zahlreichen Studenten der Uni Kiel, die bei den Messungen in Enkenbach und Trier unermüdlichen Einsatz zeigten.

### Literatur

- [1] Erkul, E., Kaplanvural, I., Wilken, D., Wunderlich, T., Meier, T. & Auras, M. (2011): Modelling of GPR and infrared thermography measurements at a weathered column of sandstone. In: Drahor, M.G. & Berge, M.E. (Eds.): Archaeological prospection. Extended Abstracts of the 9th International Conference on Archaeological Prospection. 19.-24.09.2011, Izmir (Turkey), S. 265 – 269
- [2] Egloffstein, P. (2009): Untersuchung von Salzbelastungen in Sandsteinsäulen der Kirche Enkenbach. Unveröffentlichte Daten, Institut für Steinkonservierung e.V., Mainz
- [3] WTA Merkblatt 6-4-01 (2009): Innendämmung nach WTA I: Planungsleitfaden. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München
- [4] Worch, A. & Auras, M. (2012): Innendämmung von einschaligem Ziegelmauerwerk. Bausubstanz, Heft 3/2012: S. 56 - 61
- [5] Wendler, E. & Sneathlage, R. (1988): Durability of Hydrophobing Treatments of Natural Stone Buildings. In: Marinos, P. G.; Koukis, G. C. (eds.): The Engineering Geology of Ancient Works, Monuments and Historical Sites. Proc. Intern. Symp. Athens, 19.–23.09.1988
- [6] WTA-Merkblatt 3-17-10 (2010): Hydrophobierende Imprägnierung von mineralischen Baustoffen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München
- [7] WTA Merkblatt 6-1-01 (2001): Leitfaden für hygrothermische Simulationsberechnungen. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München
- [8] WTA Merkblatt 6-2-01 (2001): Simulation wärme- und feuchtetechnischer Prozesse. Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege e.V., München
- [9] Neumann, H.-H. (1994): Aufbau, Ausbildung und Verbreitung schwarzer Gipskrusten, dünner schwarzer Schichten und Schalen sowie damit zusammenhängender Gefügeschäden an Bauwerken aus Naturstein. Dissertation, Universität Hamburg
- [10] Auras, M. (1997): Natursteinreinigung. Die Denkmalpflege 55: S. 49 – 54
- [11] Meier, T., Dietrich, K., Stöckhert, B., Harjes, H.-P., 2004. One-dimensional models of shear-wave velocity for the eastern Mediterranean obtained from the inversion of Rayleigh wave phase velocities and tectonic implications, Geophys. J. Int., 156, 45-58.

---

<sup>i</sup> „TOAST - Toolbox for Applied Seismic Tomography“, Teil des Forschungs- und Entwicklungsprogramms Geotechnologien, gefördert vom Bundesministerium für Forschung und Technologie sowie der Deutschen Forschungsgemeinschaft

<sup>ii</sup> „Analyse umweltinduzierter Schmutzkrusten und abgestufte Reinigung an den Werksteinen der Porta Nigra in Trier“, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt