



# Optimierung der permanenten Bauwerksüberwachung durch den Einsatz von zerstörungsfreien Prüfverfahren

Günther JOST, Sven HOMBURG, TÜV Rheinland / LGA, Nürnberg

**Kurzfassung.** Die permanente Bauwerksüberwachung stellt eine immer weiter verbreitete Methode der Sicherstellung der Standsicherheit bei geschädigten modernen oder historischen Bauwerken dar. Die Überwachungsanlagen werden mit Grenzwerten für die zu überwachenden physikalischen Größen ausgestattet um frühzeitig eine Alarmierung der zuständigen Stellen auszulösen. Die größte Schwierigkeit liegt in der sinnvollen Festlegung dieser Alarmgrenzen. Die Zerstörungsfreien Prüfungen ermöglichen eine genauere Erfassung tiefliegender Schäden und Strukturänderungen von Bauteilen und damit eine exaktere Einordnung des Bauwerkszustandes zum Zeitpunkt der Überwachung. Die häufig eingesetzten Verfahren wie Impact Echo, Ultraschall Echo, Radar und Aktive Thermographie bieten hier unter Baustellenbedingungen sehr gute Möglichkeiten Bauteilablösungen, Hohlräume und Rissstrukturen zu dokumentieren. Diese Erkenntnisse beeinflussen somit eine mehr oder weniger konservative Festlegung der Grenzwerte.

## 1 Permanente Bauwerksüberwachung

### 1.1 Einsatzgebiete

Die permanente Überwachung von Bauteilen, Bauwerksstrukturen oder ganzen Bauwerken gewinnt aus verschiedenen Gründen immer mehr an Bedeutung. Dabei sind grundsätzlich entweder Langzeitveränderungen im Baukörper, dynamische Belastungen der Bausubstanz oder eine Kombination aus beiden Effekten Ziel der Beobachtungen.

#### 1.1.1 Präventiver Einsatz

Bei neu errichteten Bauwerken, im Grenzbereich des technisch machbaren, werden oft schon in der Planung an kritischen Stellen Sensoren vorgesehen, die bestimmte physikalische Parameter überwachen. Die Messwerte können mit den rechnerisch ermittelten Größen der statischen Berechnung verglichen werden. Mögliche Abweichungen können zur Verfeinerung oder Korrektur der Berechnungsverfahren oder zur Überprüfung des Bauverfahrens herangezogen werden, wenn eine Ursache durch fehlerhafte Herstellung ausgeschlossen werden kann. Wird die Überwachungsanlage schon während der Errichtung des Bauwerks in Betrieb genommen, kann mit dem Baufortschritt die Ausbildung des Kräftegleichgewichts in den einzelnen Bauphasen dokumentiert werden. Dieses ermöglicht eine Qualitätsüberwachung während der, aus statischer Sicht, sehr kritischen Bauzustände.

Bei Überlastungen kann so sehr schnell reagiert und eventuellen Schädigungen entgegen gewirkt werden.

### *1.1.2 Moderne geschädigte Bauwerke*

Der häufigste Einsatz der permanenten Bauwerksüberwachung betrifft moderne Bauwerke aus den 60er und 70er Jahren mit sichtbaren Schäden. Der Grund für den Einsatz ist ebenfalls vielschichtig. Ist die Herkunft des Schadens unklar, werden die Langzeitveränderungen des Bauwerks im Vergleich zu den Umweltbedingungen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, eventuell Wasserstand oder Windgeschwindigkeit und Windrichtung, aufgezeichnet. Werden die Tageszyklen und Jahreszyklen der Temperatur aus den Messwerten eliminiert, können langfristige Trends erkannt und diesen bei kritischer Entwicklung entgegen gewirkt werden. Durch die geringe finanzielle Decke der Länder und Kommunen bedingt, können Sanierungen von Bauwerksschäden nicht in dem erforderlichen Maß durchgeführt werden. Schadhafte Bauwerke, in der Mehrzahl Brückenbauwerke der verschiedenen Verkehrswege, können so gefahrlos bis zur Sanierung oder zum Ersatz unter Betrieb gehalten werden. Dazu ist die Festlegung von Grenzwerten der Überwachungsparameter unabdingbar. Bereitschaftsdienste und ein Alarmplan über die Vorgehensweisen für die einzelnen Bauwerke müssen geregelt sein.

### *1.1.3 Historische Bauwerke*

Als dritte Gruppe werden historische Bauwerke mit permanenter Überwachungstechnik ausgerüstet. Auch hier sind sichtbare Schadensbilder auslösender Faktor für das Monitoring. Das Versagen von Bauteilen aus Altersgründen wie Materialermüdung, Korrosion und Schädlingsbefall, wegen unplanmäßigen Belastungen oder das Versagen der inneren Struktur wegen Durchfeuchtung oder Zusammenbruch der Kornstruktur können Ursache des Schadensbildes sein. Bei historischen Bauwerken muss zudem eine Sanierungsmethode gefunden werden, die neben dem Sicherheitsaspekt außerdem den Denkmalschutz mit möglichst geringem Eingriff in die historische Substanz Rechnung trägt. Eine statische oder Dynamische Berechnung scheidet oft an der Annahme des richtigen Systems beziehungsweise an der Annahme der Materialkennwerte für das historische Baumaterial. Die Ergebnisse von eingesetzten Messsystemen werden zur Kalibrierung von Finiten-Element-Berechnungen verwendet, indem verschiedene reale Lastfälle (z.B. Temperaturlastfälle) am Computer simuliert oder nachgebildet werden und die gemessenen Ergebnisse liefern müssen. Wird dieses mit hinreichender Genauigkeit erreicht, kann davon ausgegangen werden, dass ein zutreffendes Modell gefunden wurde. Dieses bildet dann den Ausgangszustand für verschiedene Sanierungsszenarien mit den entsprechenden Erfolgen und nötigen Eingriffen in die historische Bausubstanz. Auch im Fall der historischen Bauwerksstrukturen spielen Sanierungskosten eine immer größere Rolle. Die wenigen zur Verfügung stehenden Gelder sollen optimal eingesetzt und der größtmögliche Nutzen erzielt werden. Außerdem muss die Standsicherheit gewährleistet sein. So bietet sich auch hier die Möglichkeit der Grenzwertüberwachung mit Alarmierung an.

## *1.2 Festlegung der Grenzwerte*

Die Festlegung von Grenzwerten für die Überwachungsparameter bei den modernen Bauwerken mit bekannter Geometrie und bekannten Materialkennwerten relativ einfach. Es muss jedoch vorausgesetzt werden, dass bei entsprechender Qualitätsdokumentation ein fehlerhaftes oder falsches Material ausgeschlossen werden kann, als auch die Ausführung

der Bauarbeiten fehlerfrei ist. Unter Berücksichtigung von Sicherheitsfaktoren kann ein rechnerischer Wert ermittelt werden, der zum Vergleich mit den Messwerten dient.

Bei historischen Bauteilen ist oft schon die geometrische Abmessung der Bauteile unbekannt. Die verwendeten Materialien sind in hohem Maße inhomogen in Bezug auf Verteilung, Durchfeuchtung und Festigkeit. Ebenfalls ist eine Abschätzung der Materialermüdung durch Lastwechsel aus äußeren Lasten nur sehr unzureichend möglich. Eine Festlegung von Grenzwerten ist daher nur sehr konservativ möglich, mit dem Nachteil dass es oft zu Überschreitungen der Grenzwerte aus üblichen Verkehrsbelastungen und dementsprechend zu Fehlalarmen kommt. Eine großzügigere Auslegung verbietet sich im Hinblick auf die Standsicherheit.

Die verschiedenen zerstörungsfreien Prüfverfahren bieten die Möglichkeit großflächig Baufehler in modernen Bauteilen zu finden bzw. auszuschließen und bei historischer Bausubstanz die innere Struktur und Geometrie zu dokumentieren. Hier kann mehrschaliges Mauerwerk aufgelöst, Schalenablösung und Durchfeuchtung gefunden werden. Der Einsatz von zerstörenden Verfahren kann so auf ein Minimum reduziert werden und dient hauptsächlich der Kalibrierung der zerstörungsfreien Signalauswertung. Dadurch ist der Zustand des Bauwerks zum Beginn der Überwachung besser abzuschätzen und ermöglicht eine genauere Definition der Grenzwerte und eine Abschätzung des Gefahrenpotentials in Bezug auf den Alarmfall.

## 2. Zerstörungsfreie Prüfverfahren und Einsatzgebiete

### 2.1 Impact Echo

Das Impact Echo Verfahren bietet die Möglichkeit Schichtdicken und Materialablösungen sehr genau zu bestimmen. Das Verfahren ist im Baustelleneinsatz zu wirtschaftlich vertretbaren Konditionen nur punktuell einsetzbar. Eine flächige Untersuchung durch automatisierte Versuchsausführung ist in der Erprobung, unter Baustellenbedingungen sehr schwierig.

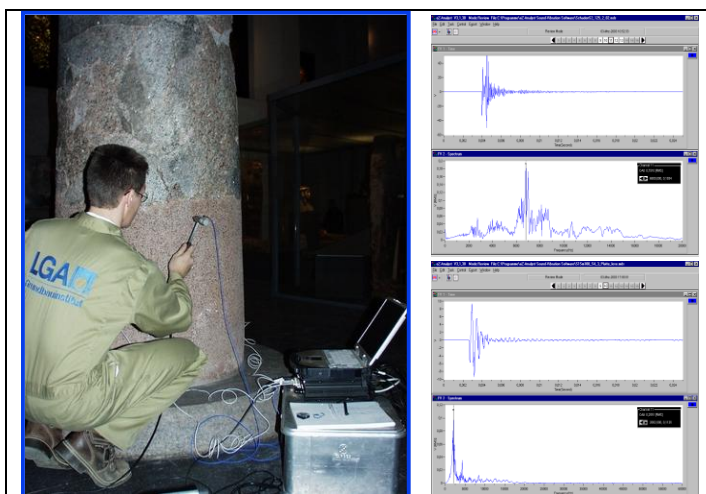
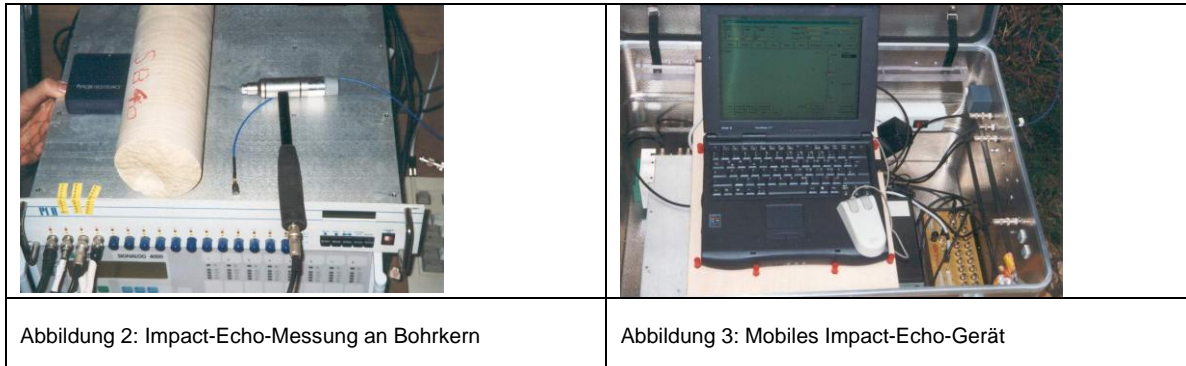


Abbildung 1: Anwendung des Impact-Echo-Verfahrens zur Bauwerksuntersuchung

Durch einen Stoßimpuls wird auf der Oberfläche eines Bauteils punktuell eine Wellenfront erzeugt, die sich räumlich im Bauteil ausbreitet und an der gegenüberliegenden Grenzfläche, an inneren Fehlstellen (z.B. Rissen, Einschlüssen) sowie an vorhandener Bewehrung und Schichtgrenzen reflektiert und gebrochen wird.

Am Anregungspunkt wird mit einem Sensor das reflektierte Signal empfangen und die Kompressionswelle ausgewertet. Dabei werden die Echos und Vielfachechos bei bekannter Schallgeschwindigkeit in eine Tiefe umgerechnet.

Die Impact-Echo Methode kann zur Überprüfung und Beurteilung der Qualität von Bauteilen aus Naturstein, Beton und Mauerwerk eingesetzt werden. Diese Messmethode kann zur Schadensanalyse und im Rahmen von Qualitätskontrollen sowohl im Labor, als auch am Objekt oder auf der Baustelle eingesetzt werden.



Das Ziel der Untersuchungen ist es, Fehlstellen in einer Konstruktion zu lokalisieren, die Dicke auch bei nur einseitig zugänglichen Bauteilen zu bestimmen und das Auffinden von Hohlräumen zu ermöglichen. Sind die Abmessungen der zu untersuchenden Bauteile bekannt, kann die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit im Bauteil ermittelt werden.

Anwendungsmöglichkeiten von Impact-Echo:

- Lokalisierung von Hohlräumen oder Fehlstellen (Ort und Größe z.B. Risse,
- Hohlräume, stoffliche Inhomogenitäten
- Schichtwechsel (z.B. im Stein oder Straßenaufbau)
- Bauteildicken
- Wellenausbreitungsgeschwindigkeit (bei Kenntnis der Bauteilmaße in Messrichtung)
- Lokalisierung von Ablösungen

## 2.2 Ultraschall Echo

Die Ultraschall-Echotechnik beruht auf der Reflektion von Schallwellen an Diskontinuitäten wie Werkstoffinhomogenitäten, Grenzflächen, Hohlstellen und der Bauteilrückwand. Aus den empfangenen Signalen kann direkt eine Aussage über den Bauteilzustand oder über innere Schäden getroffen werden.

Der Vorteil unserer Ultraschall-Echotechnik gegenüber der bekannten Ultraschall-Durchschallungstechnik ist, dass nur eine Bauteilseite zugänglich sein muss.

An Holz können Schäden unter günstigen Bedingungen wie Zugänglichkeit, Rissarmut und ungeschädigter Oberfläche mit unserem Ultraschallechogerät zerstörungsfrei festgestellt werden. Das Gerät wird ohne Koppelmittel am Bauteil angekoppelt.

An Beton ist es möglich, mittels Ultraschall-Echotechnik die Dimension von Bodenplatten, die Lage von Streifenfundamenten und/oder Aussparungen zu analysieren sowie Kiesnester zu orten.

Messungen an Holzbalken ergaben, dass die Bauteilrückseite bei ungeschädigten Holzbalken sehr gut ermittelt werden kann (s. Abbildung 5). Ist kein Rückwandecho zu empfangen deutet dies auf eine Schädigung hin.

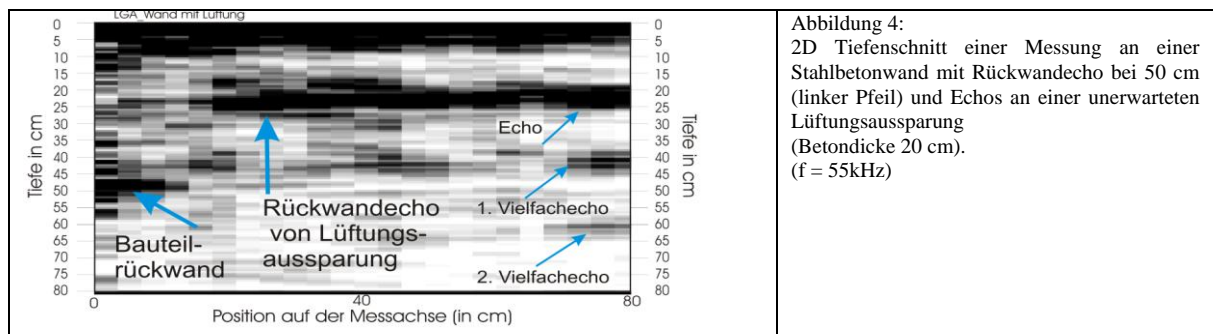


Abbildung 4:  
2D Tiefenschnitt einer Messung an einer Stahlbetonwand mit Rückwandecho bei 50 cm (linker Pfeil) und Echos an einer unerwarteten Lüftungsaussparung (Betondicke 20 cm). (f = 55kHz)

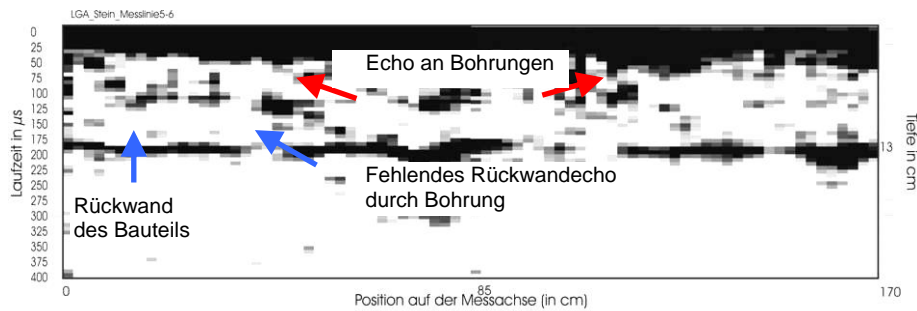


Abbildung 5:  
2D Tiefenschnitt einer Messung an einem Balken mit Rückwandecho (f = 55 kHz, Nadelholz) Pfeile markieren Bereiche der Bohrungen

**Anwendungsmöglichkeiten von Ultraschallecho:**

Bestimmung von Bauteilabmessungen wie:

- gleichmäßige Dicke von nur einseitig zugänglichen Bauteilen wie Fundamenten und eingebauten Balken
- Lage von nicht sichtbaren Aussparungen
- Lage von Dübelverbindungen

Ortung von Schäden wie:

- Hohlstellen
- Verdichtungsmängeln (Kiesnester)
- Ablösungen, Rissen parallel zur Oberfläche
- Fäulnis
- Ästen

*2.3 Radar (Impulsradar, Georadar)*

Mit Radar können Störungen in massiven Körpern (Bauwerken, Bauteilen, Boden) durch Reflexionen von elektromagnetischen Wellen festgestellt werden. Das Prinzip dieses zerstörungsfreien Prüfverfahrens ist das Aussenden und das Empfangen von elektromagnetischen Wellen im MHz-Bereich. Dabei kann aus den reflektierten, empfangenen Signalen eine Aussage über den untersuchten Bereich gemacht werden. Gemessen werden die Laufzeiten und Amplituden der Radarwellen, wodurch Schichtgrenzen und Einzelobjekte entlang von Profilen in Profilschnitten (Radargrammen) erfasst werden. Zudem kann aus mehreren, nebeneinander verlaufenden, Radargrammen Tiefenschnitte erzeugt werden, die man nachträglich als dreidimensionales Modell des Untersuchungsbereiches darstellen kann.





Abbildung 6: Radarmessung mit Ergebnissen, dargestellt als 3D-Tiefenbild

In Abbildung 6 ist eine Messung mit einer 1,6 GHz Radarantenne an einem Betontrog zu sehen. Ziel der Messung war es, die Lage der Quer- und Längspannglieder zu bestimmen, um Bereiche für eine zusätzliche Auftriebsverankerung festlegen zu können. Im Ergebnis der Messung konnte zerstörungsfrei die Lage der Bewehrung, der Lagerisen und der Spannglieder eindeutig bestimmt werden. Dieses wurde durch ein späteres Öffnen des Betons bestätigt.

In der Geophysik dient das Radar zur Untersuchung der oberen Schichten der Erdkruste. Dabei werden kurze Impulse von wenigen Nanosekunden ausgehend von der Oberfläche in den Untergrund gesendet und als Reflektion von Schichtgrenzen, Objekten sowie Einlagerungen empfangen. Die Ausbreitung der elektromagnetischen Wellen im Untergrund ist dabei vergleichbar mit der Ausbreitung elastischer Wellen, wobei an die Stelle der elastischen Eigenschaften der Medien deren elektrische Eigenschaften treten. An Holz können mit Radar metallische Verbindungsmittel wie z.B. Gewindestangen in BSH-Bindern in ihrer Lage bestimmt werden. Zudem ist es möglich, die Position von Deckenbalken in einer Holzbalkendecke oder die Lage der Ständer in einer beplankten Holztafelwand zu ermitteln.

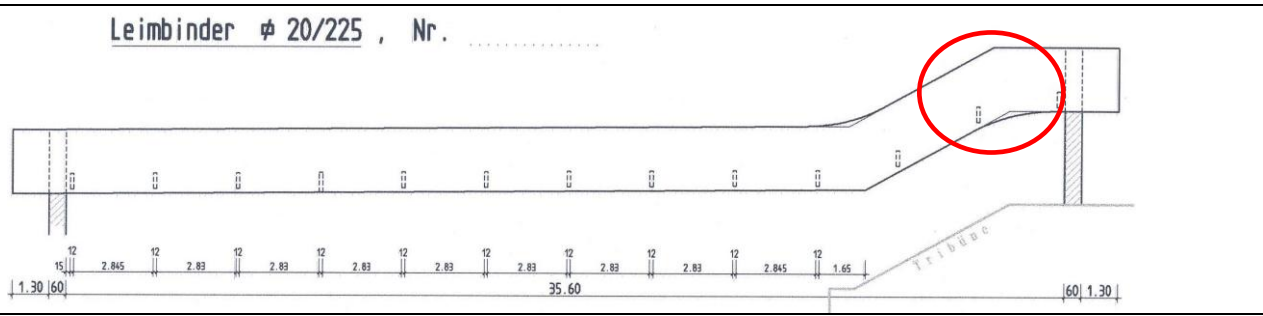


Abbildung 7: Zeichnung von untersuchtem Brettschichtholz binder (roter Kreis: Untersuchungsbereich)

Bei einer Reparaturmaßnahme an BSH-Bindern mit Querschnittsrissen in einer Sporthalle war es laut Statik erforderlich zusätzliche Gewindestangen in die Träger einzubringen. Bei den Bohrungen für die zusätzlichen Gewindestangen stellte sich heraus, dass die bereits vorhandenen Stangen nicht wie im Plan festgehalten im Binder verlaufen. Deshalb wurden nach erfolglosen Untersuchungen mit einem induktiven Bewehrungssuchegerät (Hilti Ferroskan) Messungen mit Radar durchgeführt. Obwohl alle Träger augenscheinlich

gleich aussahen, stellte sich heraus, dass in Bezug auf die Gewindestangen jeder der Träger ein Unikat war.

Mit den Information aus der zerstörungsfreien Prüfung war es möglich, einen weiteren Sanierungsplan zu erstellen.

In Abbildung 9 sind Messlinien am BSH-Binder zu sehen. Die zugehörigen Radargramme können der Abbildung 10 und 11 entnommen werden. Deutlich ist hier die Lage der Gewindestäbe zu sehen.



Abbildung 8: Radarmessung an BSH-Binder



Abbildung 9: Lage der Gewindestangen (rote Linien) und Messspuren (gepunktete Linien)

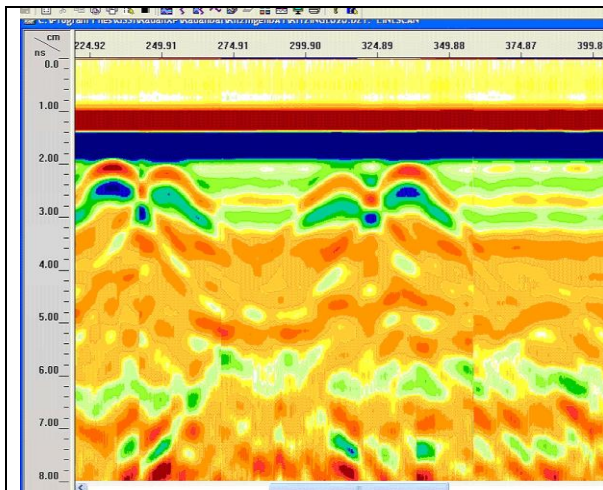


Abbildung 10: Radargramm einer Messung in Trägermitte mit Reflexionen von beiden Übergreifungsstößen der Gewindestangen

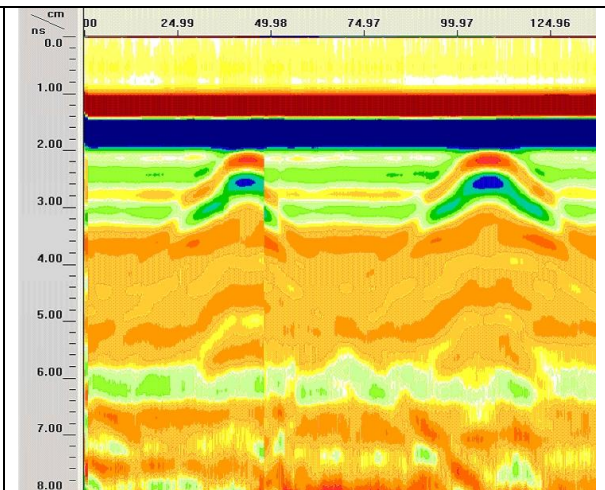


Abbildung 11: Radargramm einer Messung am unteren Trägerrand mit Reflexionen von beiden Gewindestangen

## Anwendungsmöglichkeiten von Radarmessungen

- Beton- und Stahlbetonbau (z.B. Brücken, Tunnel und Industriebauwerke)  
struktureller Aufbau (Schalen, Dicken), Einbauteile (Stähle, Klammern, Dübel, Anker) und Schadstellen (Risse, Ablösungen),



- Mauerwerk (z.B. in historischen Bauwerken)  
struktureller Aufbau (Schalen, Dicken), Einbauteile (Klammern, Dübel, Anker, Hölzer), Schadstellen (Risse, Ablösungen), Feuchte- und Salzverteilung, Sanierungskontrolle
- Geologie (z.B. Hohlräume, Boden- und Sedimentsschichten)
- Altlasten im Untergrund (z.B. Ablagerungen, Industriebrachen)

## 2.4 Aktive Thermographie

Die aktive Thermographie nützt die unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit von Materialien, Strukturen und Hohlräumen. Die Bauteile werden flächenhaft durch Infrarotstrahler erwärmt und die Abkühlphase mit der Thermographiekamera über längeren Zeitraum aufgezeichnet. Die Energieabgabe an die Oberfläche erfolgt für die verschiedenen Tiefen zeitversetzt und so kann eine Tiefenauflösung über die verstrichene Zeit erreicht werden. Die Anwendung erstreckt sich hauptsächlich auf Beton- und Natursteinbauteile sowie Mauerwerk.

Untersuchung der Struktur von 4000 Jahre alten Natursteinsäulen aus rotem Granit



Abbildung 12: Originalabbildung des Bauteiles

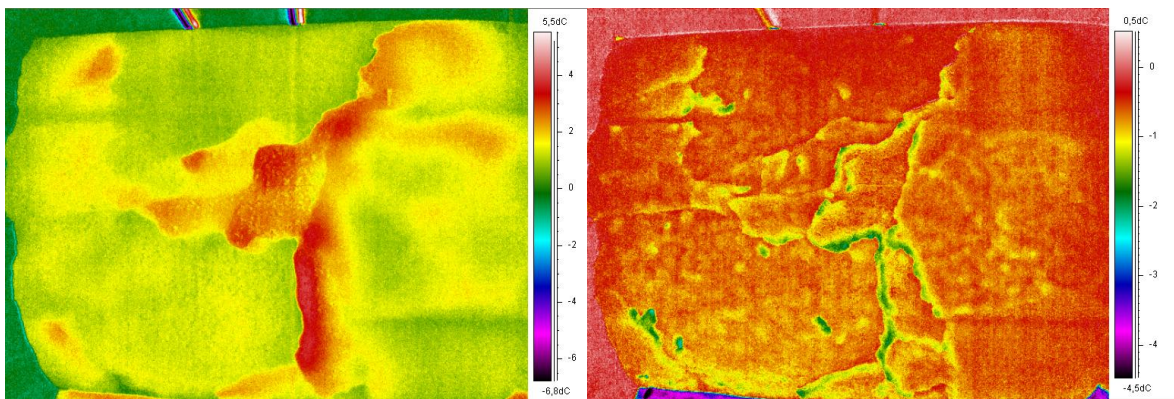


Abbildung 13: Oberflächliche Ablösung von Steinschichten

Abbildung 14: Tiefliegende Rissstrukturen

Anwendungsmöglichkeit der aktiven Thermographie:

Oberflächennahe und tiefliegende Strukturfehler in Bauteilen