

# Oberflächenparallele Ablösungen auf Betontragwerken – Detektion und Bewertung mittels zerstörungsfreien Prüfverfahren

Philipp TRUFFER<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Valtest AG, Lalden, Schweiz

Kontakt E-Mail: philipp.truffer@valtest.ch

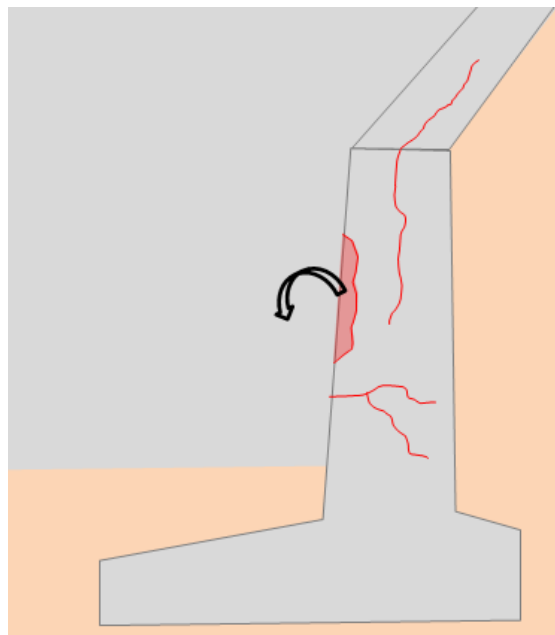
**Kurzfassung.** Verwitterung und Korrosion können bei Betontragwerken zu Abplatzungen und Schalenbildungen führen. Bei Brandeinwirkungen auf Beton kommt es häufig zu Schalenbildungen, beginnend von einer Kante aus. „Die durch die betonschädigende AKR entstandenen Risse im Beton knicken nach wenigen Zentimetern ab und verlaufen dann etwa parallel zur Oberfläche.“ (DAfStb-Empfehlung für die Schadensdiagnose und Instandsetzung von Betonbauwerken, die infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind). Diese oberflächenparallelen Ablösungen stellen folglich ein Problem dar. Sie können u.U. Menschen und/oder Einrichtungen gefährden oder die Tragsicherheit des Bauwerks beeinträchtigen.

Folglich ist es im Rahmen einer Zustandserfassung und –beurteilung von Tragwerken von Wichtigkeit hohl liegende Bereiche, wenn möglich grossflächig und zerstörungsfrei, detektieren zu können. Mit den modernen zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen liegen entsprechende Hilfsmittel vor. Je nach Tiefe der Schalen und Ablösungen kann die aktive Infrarot-Thermografie, die Ultraschall-Tomografie oder das Impact-Echo-Verfahren eingesetzt werden. Der Posterbeitrag zeigt anhand von konkreten Beispielen aus der Praxis die Tauglichkeit, aber auch die Grenzen der erwähnten Prüfverfahren für die entsprechenden Anwendungen.

## 1. Einführung

Im Rahmen von Zustands- und Schadenserfassungen bei Stahlbetonbauteilen stellt sich vielfach die Frage, ob am zu untersuchenden Bauteil oberflächenparallele Ablösungen oder Schalenbildungen vorhanden sind. Karbonatinduzierte Korrosionsschäden führen beispielsweise zu einer Volumenvergrößerung der betroffenen Bewehrung und können zu entsprechenden Abplatzungen im Beton führen. Mangelhafte flügelgeglättete Bodenplatten, Verbundestriche oder Wand- oder Bodenbeläge können Hohlstellen aufweisen, welche unter Umständen die Gebrauchsfähigkeit der entsprechenden Bauteile beeinträchtigen können. Frostschäden bei Betonbauteilen zeichnen sich u.a. durch oberflächige Ablösungen aus. Bei Brandeinwirkungen auf Stahlbetonbauwerke kann es, vielfach von einer Kante ausgehend, ebenfalls zu Schalenbildungen und Ablösungen kommen.

In der DAfStb-Empfehlung [6] wird explizit erwähnt, dass bei AKR-geschädigten Bauwerken oberflächige Risse senkrecht zur Bauteiloberfläche bis in eine Tiefe von etwa 100 mm verlaufen und dann dort häufig parallel dazu abbiegen. „Die durch die betonschädigende AKR entstandenen Risse im Beton knicken nach wenigen Zentimetern ab und verlaufen dann etwa parallel zur Oberfläche. Bei Aufbau von zu grossen Drücken kann es deshalb zu schalenartigen Abplatzungen des vorgeschädigten Betons kommen.“. Inwieweit diese doch absolut formulierte Aussage effektiv an den AKR-geschädigten Bauwerken auftritt, soll im Rahmen des vorliegenden Posterbeitrags nicht weiter kommentiert werden. Es soll vielmehr auf die aufgeworfene Problematik von oberflächenparallelen Ablösungen und Schalenbildungen aufmerksam gemacht werden. Neben Fragen der Dauerhaftigkeit können solche Erscheinungen z.B. bei vertikalen Tragwerken wie Stützmauern die Tragsicherheit oder aber auch die Sicherheit der sich darunter befindende Menschen beeinträchtigen (Gefahr durch herunterfallende Betonstücke).



**Abb. 1.** Prinzipskizze Rissbild in einer Stützmauer – wie und wo verlaufen die oberflächig erkennbaren Risse? Ist aufgrund der Rissbildung mit oberflächenparallelen Ablösungen oder Schalenbildungen zu rechnen?



**Abb. 2.** Beispiel einer AKR-geschädigten Stützmauer, Ansicht (links) und Detail Mauerkrone mit Rissbild (rechts)

Können solche Hohl- und Fehlstellen im Rahmen von Zustandserfassungen oder objektbezogenen Schadens-Analysen grossflächig mittels zerstörungsfreien Prüfverfahren detektiert und lokalisiert werden? Dabei geht es bei dieser Fragestellung nicht primär um den Nachweis von lokalen Strukturstörungen wie z.B. Kiesnestern.

## 2. Untersuchungsverfahren

Für die Detektion und den Nachweis von oberflächenparallelen Ablösungen und Schalen wurden an mehreren Prüfkörpern verschiedene zerstörungsfreie Prüfverfahren eingesetzt. Nachfolgend werden die entsprechenden Verfahren kurz umschrieben, wobei auf eine detaillierte Erläuterung bewusst verzichtet wird und stattdessen auf die entsprechenden ausgewählten Literaturreferenzen verwiesen.

Für die beschriebene Aufgabenstellung kommen meistens einseitig zugängliche Bauwerke oder Bauwerksteile wie Bodenplatten oder Stützmauern in Frage. Folglich eignen sich grundsätzlich die nachfolgend beschriebenen Echoverfahren als Nachweisverfahren. Beim Vorliegen eines Echsignals von der Rückwandseite des Bauteils kann man davon ausgehen, dass dieses nicht geschädigt ist und auch keine inneren Störungen im Bauteil vorhanden sind.

### 2.1. Ultraschall

#### 2.1.1. Verfahrensbeschreibung

Beim Ultraschall handelt es sich um ein akustisches Verfahren. Die eingebrachten Schallwellen werden dabei an Grenzflächen, Hohlstellen und der Bauteilrückwand sowie an Werkstoffinhomogenitäten und Störungen reflektiert (siehe [1]).

#### 2.1.2. Messsystem

Die Ultraschalluntersuchungen wurden mit dem niederfrequenten Ultraschall-Tomografen A1040 MIRA durchgeführt (siehe Abb. 3). Es handelt sich sicher hierbei um ein Messsystem ohne separates Koppelungsmittel, bei welchem die Anregung mittels Scherwellen erfolgt. Das Scherwellen-Ultraschallarray umfasst eine Vielzahl von federnd gelagerten Punktkontaktprüfköpfen, welche für die Ankopplung erforderlich sind.

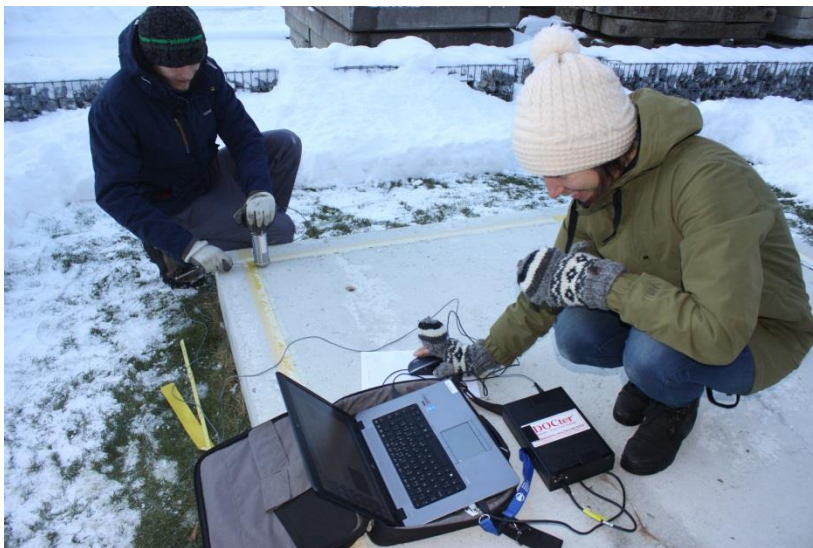


Abb. 3 Ultraschall-Messung auf dem Prüfkörper C

## 2.2. *Impact-Echo*

### 2.2.1. *Verfahrensbeschreibung*

Beim Impact-Echo-Verfahren handelt es sich ebenfalls um ein akustisches Messverfahren. Es beruht auf der Analyse von Vielfachreflexionen elastischer Wellen zwischen der Ober- und Unterseite eines Bauteils nach einer Impulsanregung auf der Bauteiloberfläche. Die Anregung wird durch ein Aufschlagen von unterschiedlich grossen Stahlkugeln erzeugt, welche einen mechanischen Stoss auf der Oberfläche des Bauteils auslösen (siehe Abb. 4). Der dabei verwendete Kugeldurchmesser ist abhängig von der Bauteildicke bzw. von der Tiefenlage des zu erwartenden Schadens. Die Wellen durchlaufen den Probekörper und werden an akustischen Grenzflächen reflektiert. Die im Bereich der Anregung gemessenen Schallwellen werden auf Resonanzfrequenzen untersucht und entsprechend Bauteildicken zugeordnet (siehe [3] und [4]).



**Abb. 4.** Durchführung einer Impact-Echo-Messung an einem Prüfkörper  
Hinten links wird die Schallwelle durch das Aufschlagen einer Stahlkugel auf die Betonoberfläche auslöst und die Signale mit einem piezoelektrischen Sensor aufgenommen.

### 2.2.2. *Messsystem*

Für die vorliegenden Messaufgaben wurde das DOCTer Impact-Echo Test System von German Instruments eingesetzt.

## 2.3. *Impuls-Radar*

### 2.3.1. *Verfahrensbeschreibung*

Beim Radarverfahren handelt es sich um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, bei welchem durch Messung und Auswertung von elektromagnetischen Wellen Störungen und Inhomogenitäten im Bauteil festgestellt werden können. Bei der Messung werden die Laufzeit und die Amplitude der empfangenen Radarwellen erfasst. Sowohl die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Impulse wie auch die Intensität der Reflexionen hängen von den dielektrischen Eigenschaften der Bauteilmaterialien ab (siehe [2]).

### 2.3.2. *Messsystem*

Im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen wurde das Radarsystem GSSI SIR-400 GPR eingesetzt. Dabei kamen unterschiedliche Antennen von 900 MHz bis 2 GHz zum Einsatz.

## 2.4. *Aktive Infrarot-Thermografie*

### 2.4.1. *Verfahrensbeschreibung*

Bei der aktiven Infrarot-Thermografie oder Impuls-Thermografie wird das zu untersuchende Bauteil zeitabhängig aktiv erwärmt und dabei entweder das Aufwärm- oder im Normalfall eher das Abkühlverhalten mit einer Infrarotkamera erfasst. Allfällige Inhomogenitäten im Bauteil mit abweichenden thermischen Materialeigenschaften von deren Umgebung verändern den Wärmefluss in diesen Bereichen. Durch die zeitliche Veränderung der Temperatur auf der Oberfläche können oberflächennahe Inhomogenitäten detektiert werden, sofern sie einen messbaren Temperaturunterschied verursachen (siehe hierzu [5]).

Die wichtigsten Materialeigenschaften bei der Wärmeausbreitung sind dabei der Wärmeeindringkoeffizient (thermische Effusivität) und der Temperaturleitwert (thermische Diffusivität).

Grundsätzlich stehen für die Erwärmung verschiedene Quellen zur Verfügung. Für die Erwärmung mittels Wärmestrahlung können beispielsweise Infrarotstrahler oder Blitzlichtlampen, für die Erwärmung mittels Konvektion Heizlüfter angewendet werden. Ziel der vorliegenden Untersuchungen war es die Eignung der beschriebenen Verfahren in der Praxis an grösseren Bauteilen nachzuweisen. An grossen, flächigen Bauteilen wie Stützmauern ist eine gleichmässig aktive Erwärmung mit den oben beschriebenen Instrumenten nur schwerlich möglich. Aus diesem Grund wurden im Rahmen der durchgeführten Untersuchungen u.a. auf die Sonneneinstrahlung als Wärmequelle und die Abkühlung durch Wind zurückgegriffen.

Im Gegensatz zur passiven Thermografie, bei welcher möglichst stationäre Umgebungsverhältnisse vorausgesetzt werden, ist bei der Ausbreitung von thermischen Wellen im Material die thermische Diffusivität von Bedeutung.

### 2.4.2. *Messsystem*

Im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Messuntersuchungen wurde folgendes Kamerasystem eingesetzt:

- System: VARIOCAM HD
- Temperaturmessbereich: -40 °C – 1'200 °C
- thermische Auflösung bei 30 °C: besser als 0.05 K
- spektrale Empfindlichkeit: 7.5 µm - 14 µm
- geometrische Auflösung: 1.5 mrad

### 3. Prüfkörper

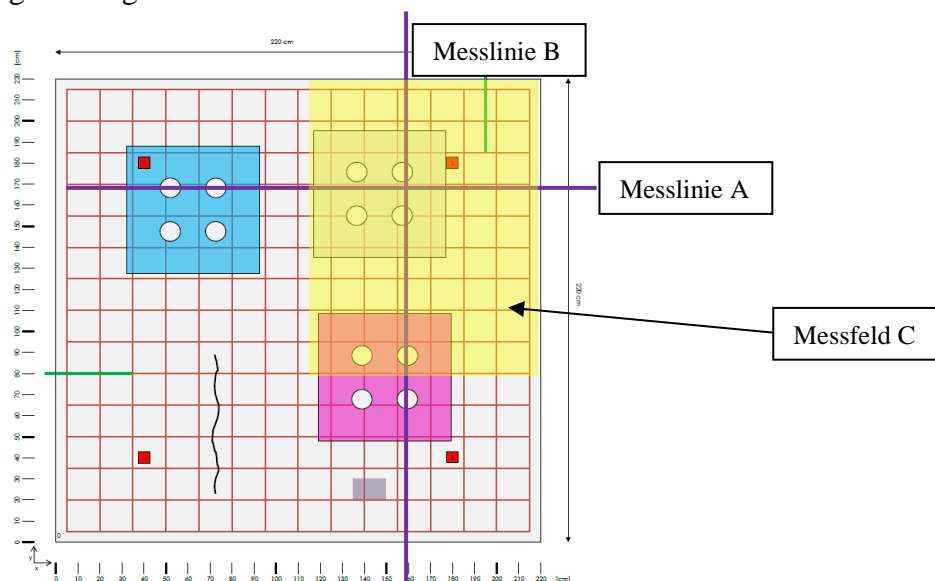
An eigens angefertigten Prüfkörpern wurden die unter 2. beschriebenen zerstörungsfreien Prüfverfahren eingesetzt. Dabei sollten einerseits die Machbarkeit der verschiedenen Verfahren nachgewiesen und andererseits die Nachweis- bzw. Detektionsgrenzen bestimmt werden.

Im Rahmen des vorliegenden Vortrags wird nur auf den Prüfkörper C eingegangen. Dieser wurde insbesondere für horizontale und vertikale (Rissmodell) Ablösungen hergestellt. Es handelt sich dabei um eine 20 cm dicke, beidseitig bewehrte Stahlbetonplatte mit den Seitenlängen 2.2 x 2.2 m (siehe Abb. 5). In unterschiedlichen Tiefen wurden verschiedene Einlagen bzw. Trennlagen eingebaut (Abmessungen 60 x 60 cm mit 10 cm grossen kreisförmigen Öffnungen). Die 0.1 mm dicke PE-Folie (einlagig) wurde erst während dem Betoniervorgang verlegt. Zusätzlich zu den drei horizontal eingebauten Einlagen wurde nach eine vertikale, doppelt verlegte PE-Folie zwischen den Bewehrungseisen verlegt. Diese Einlage ist jedoch für die vorliegenden Untersuchungen unerheblich.



**Abb. 5** Prüfkörper C vor dem Betonieren mit den eingelegten (hellblau und pink) Dämmmatten (links) sowie die während dem Betoniervorgang eingelegte PE-Folie (rechts)

Die Abb. 6 zeigt die planische Darstellung des untersuchten Prüfkörpers C mit den nachfolgend ausgewerteten Messlinien und Messfeldern.

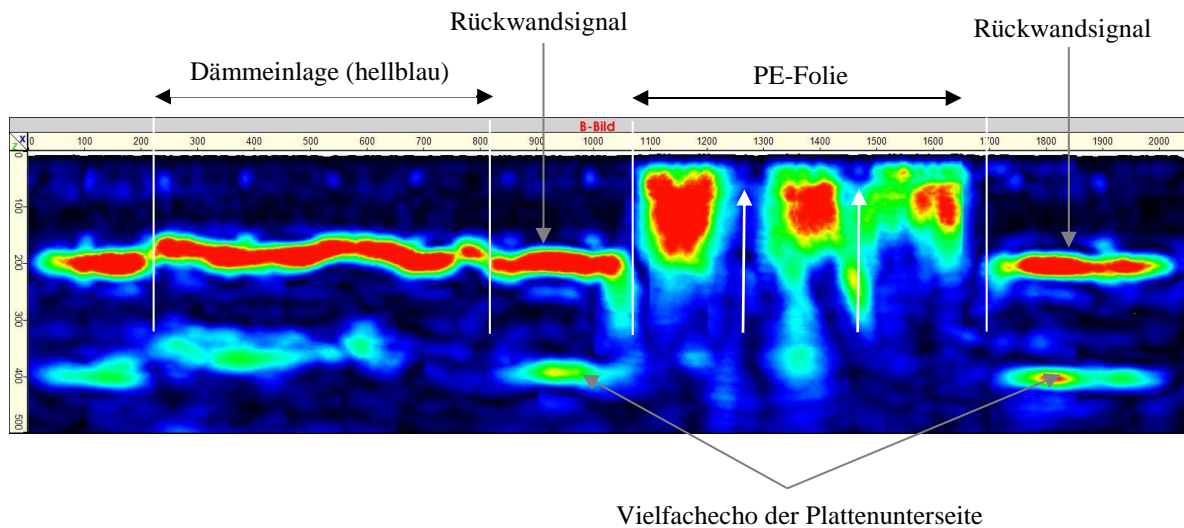


**Abb. 6** Planskizze Prüfkörper C mit den eingezeichneten Messlinien und Messfeldern

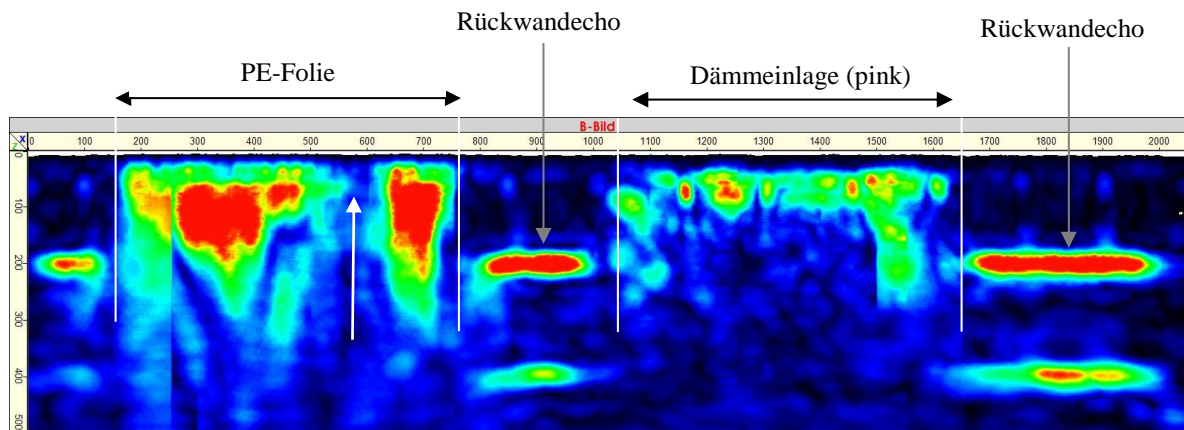
## 4. Ergebnisse

### 4.1. Ultraschall

Die nachfolgenden Abbildungen dokumentieren die Ergebnisse der Ultraschall-Tomografie-Messuntersuchungen. Die Auswertungen zeigen dabei die Resultate der Messungen mit einem Messraster von 10 x 10 cm.

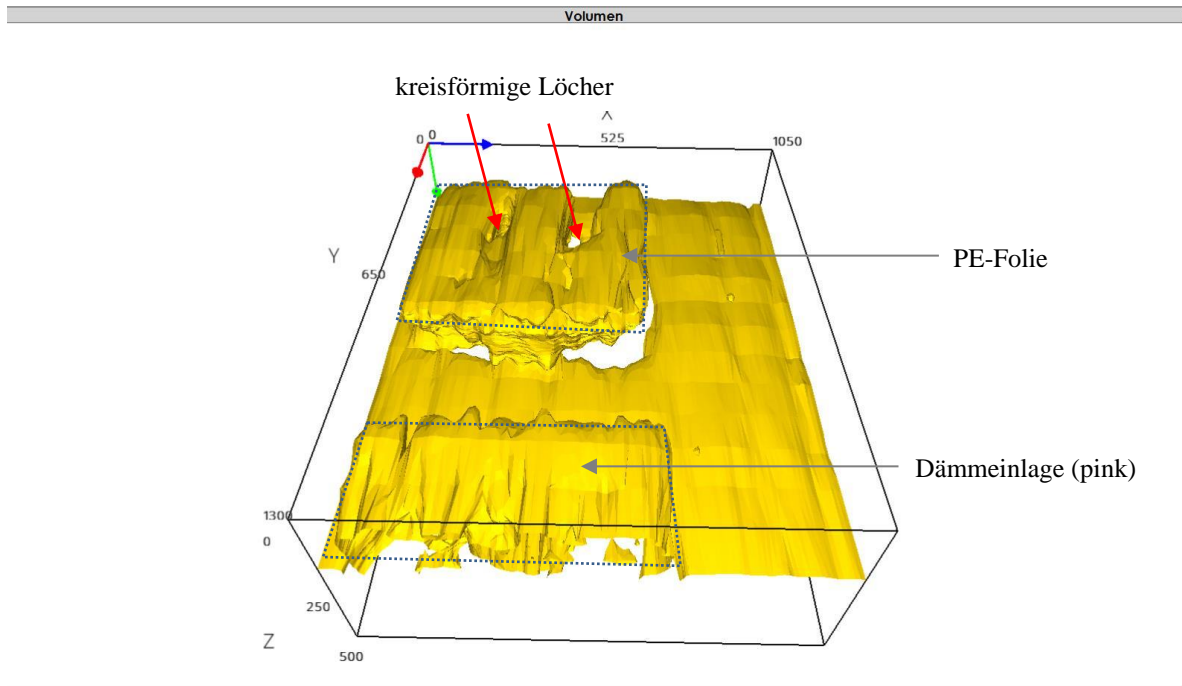


**Abb. 7** B-Bild Messlinie A (siehe Abb. x)  
Die Pfeile markieren dabei die runden Öffnungen (Durchmesser 10 cm) in der eingelegten PE-Folie.



**Abb. 8** B-Bild Messlinie B (siehe Abb. x)

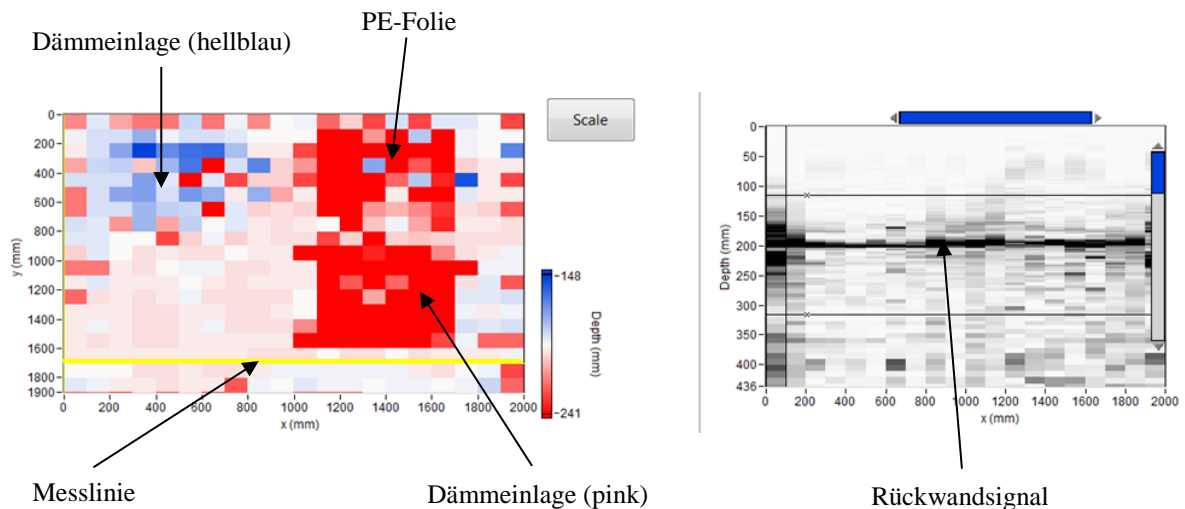
Mit der Ultraschall-Tomografie konnten die im Prüfkörper C eingelegten Dämmmatten und die PE-Folie in der Lage sowie in der Bauteiltiefe eindeutig detektiert werden. Insbesondere in der PE-Folie konnten dabei sogar die kreisrunden Öffnungen (Durchmesser 10 cm) nachgewiesen werden.



**Abb. 9** Volumendarstellung Messfeld C (siehe Abb. x)  
Die Pfeile markieren die kreisrunden Öffnungen in der PE-Folie.

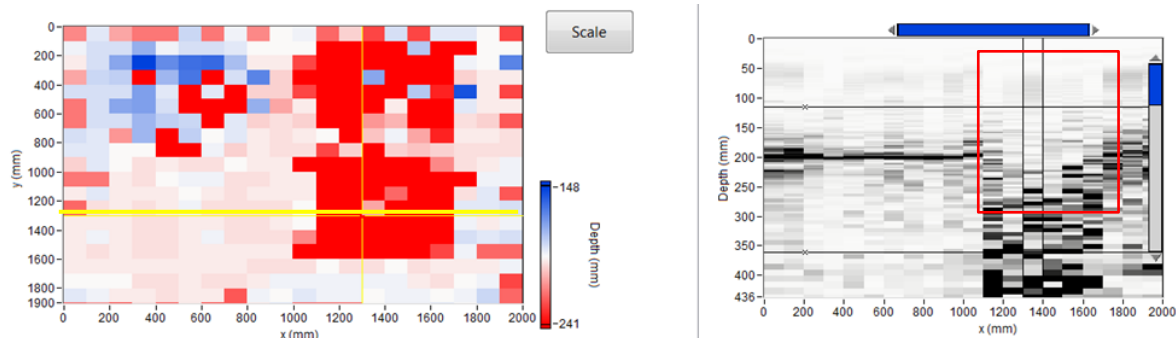
#### 4.2. Impact-Echo

Die nachfolgenden Abbildungen dokumentieren die Ergebnisse der Impact\_Echo-Messuntersuchungen. Die Auswertungen zeigen dabei die Resultate der Messungen mit einem Messraster von 10 x 10 cm.



**Abb. 10** Auswertung Draufsicht (links) und B-Scan Messlinie (gelb) ungestörter Bereich (rechts)

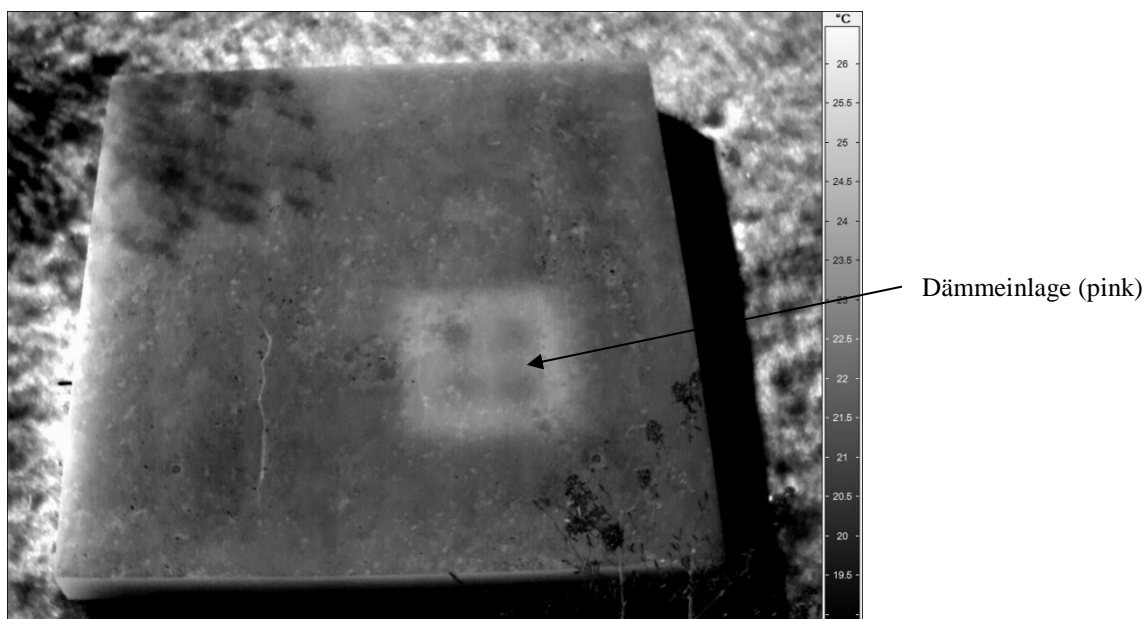
Die Dämmeinlage pink befindet sich 65 mm unter der Betonoberfläche unter der zweilagig verlegten Bewehrung.



**Abb. 11** Auswertung Draufsicht (links) und B-Scan Messlinie (gelb) im Bereich der Dämmeinlage (pink) unter der oberen Bewehrung (rechts)

### 4.3. Infrarot-Thermografie

Die Abbildungen 12 und 13 zeigen die ausgewerteten Wärmebilder während des Aufwärmvorgangs durch die Sonneneinstrahlung und während des anschließenden Abkühlvorgangs. Auf eine weitergehende Auswertung der Wärmebilder im Amplituden- oder Phasenbereich wurde hierbei verzichtet.



**Abb. 12** ausgewertetes Wärmebild Prüfkörper C in der Aufwärmphase (ca. 30 Minuten nach Beginn der Erwärmung)

Mittels der aktiven Infrarot-Thermografie wurde die Dämmeinlage pink (siehe Abb. 6) unter den oberen Bewehrungslagen (65 mm unter Oberfläche) detektiert. Die in der Dämmplatte angebrachten kreisrunden Öffnungen ( $d=10$  cm) sind dabei klar erkennbar. Hingegen konnte die auf der Bewehrung verlegte PE-Folie weder in der Aufwärm- noch in der Abkühlphase auf den Wärmebildern nachgewiesen werden. Die dünne (0.1 mm) Folie bewirkt keinen nennenswerten thermischen Unterschied im Prüfkörper.

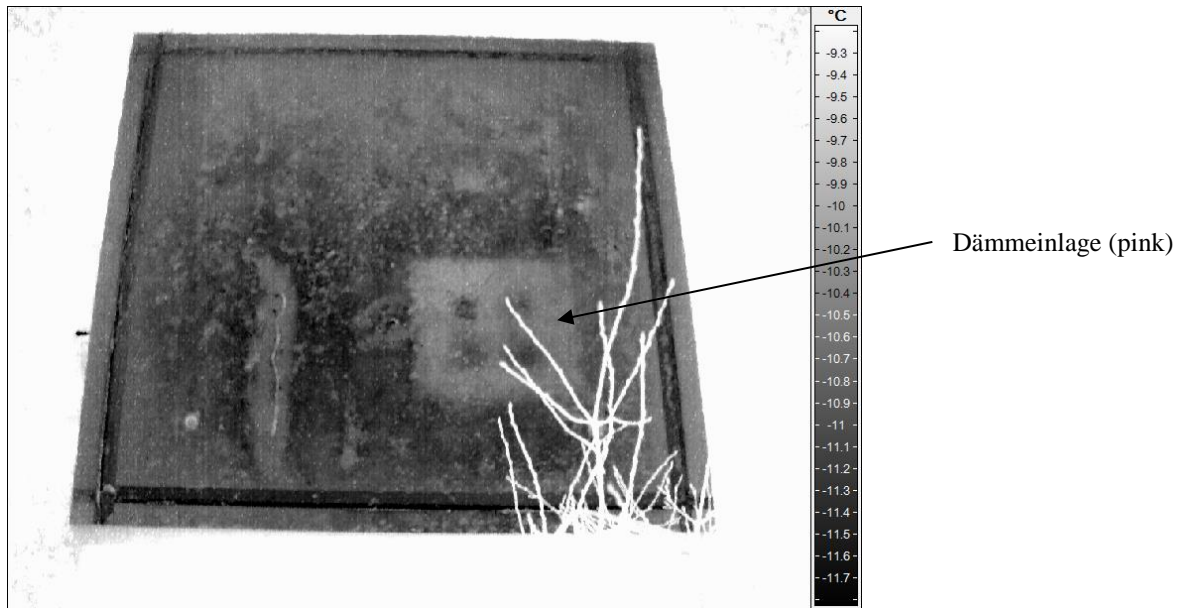


Abb. 13 ausgewertetes Wärmebild Prüfkörper C in der Abkühlphase

## 5. Fazit

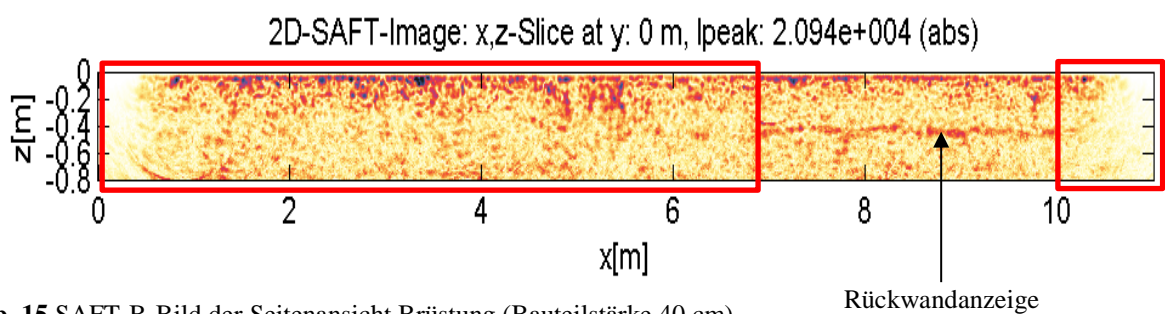
Die praxisbezogenen Untersuchungen an eigens hergestellten Prüfkörpern haben gezeigt, dass mit den modernen zerstörungsfreien Prüfverfahren oberflächenparallele Ablösungen und Schalenbildungen an Betonbauwerken detektiert werden können. Die Verfahren eignen sich insofern, als dass es sich um Echo-Verfahren handelt und somit das Bauteil nur einseitig zugänglich sein muss.

Die akustischen Verfahren Ultraschall oder Impact-Echo sind insofern ideal, als dass es beim Übergang der Schallwellen von Beton an Luft zu einer Totalreflexion kommt. Somit reichen schon kleinste Mikromillimeter kleine Hohlräume im Beton aus, dass es dann zu einer vollständigen Reflexion kommt. Die Schadenserfassung erfolgt über den Nachweis einer fehlenden bzw. gestörten Rückwandanzeige. Nachteilig dabei ist jedoch die Tatsache, dass die Schichtstärke bzw. die Abmessungen des Hohlraums mit den akustischen Verfahren nicht bestimmt werden können. In der Praxis führen vielfach kleinste Berührungen im Bauteil z.B. durch Zuschlagsstoffen zu Schallbrücken, welche dann zu einer Streuung des Signals führen können und somit keine eindeutige Zuordnung bzw. Charakterisierung der Fehlstelle erlauben. Ein weiterer Nachteil der erwähnten Verfahren ist der Umstand, dass es sich um punktuelle Messmethoden handelt und somit anderen Verfahren wie z.B. Radar relativ zeitaufwendig ist. Mit Ultraschall und Impact-Echo können, bedingt durch die laufzeitabhängige Signalschwächungen sowie materialabhängige Dämpfungen, Ablösungen oder Bauteilstärken bis zu rund einem Meter nachgewiesen werden.

Die folgenden Abbildungen 14 und 15 zeigen ein Beispiel einer Ultraschall-Messung bei einer Eisenbahnbrücke. Dabei ging es darum nachzuweisen, wie tief die an der Oberfläche visuell erkennbaren klaffenden Risse in das Bauteil hineinreichen. Bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen sind auf relativ grossen Längen Bereiche ohne Echo-signal von der Brüstungsrückseite vorhanden. Die anschliessend durchgeführten Kernbohrungen bestätigten die Bauteilschädigungen.



**Abb. 14** Ultraschall-Messung bei einer AKR-geschädigten Brüstung bei einer Eisenbahnbrücke [7]



**Abb. 15** SAFT-B-Bild der Seitenansicht Brüstung (Bauteilstärke 40 cm)  
Die rot markierten Bereiche zeigen das fehlende Rückwandsignal.

Die Impuls-Thermografie erlaubt die berührungslose Detektion von oberflächennahen Fehlstellen in Betonbauwerken bis in eine Tiefe von etwa 10 cm. Damit können somit vielfach schon Abplatzungen im Beton infolge von karbonatinduzierter Bewehrungskorrosion festgestellt werden. Durch verschiedene Signal- und Bildverarbeitungsalgorithmen (Filter, Glättung u.w.) können verbesserte Kontraste erreicht werden. Zudem können mittels Bildung von Temperatur-Zeit-Kurven über Fehl- und Referenzstellen und daraus berechneten Differenzkurven Wärmebilder quantitativ ausgewertet werden.

Bei grösseren Bauteilstärken ab rund 1.0 Metern wie sie beispielsweise bei grossen Stützmauern möglich sind, kann das Impuls-Radarverfahren eingesetzt werden.

Mittels zerstörungsfreien Prüfverfahren können oberflächenparallele Ablösungen und Schalenbildungen an Betonbauwerken detektiert werden. Die Anwendung der erwähnten Prüfverfahren in der Praxis zeigt, dass vielfach eine Kombination von mehreren Prüfverfahren erforderlich bzw. empfehlenswert ist.

Und schliesslich gilt wie immer bei der Anwendung von zerstörungsfreien Prüfverfahren, dass jedes Bauwerk mit seiner Umgebung und den entsprechenden Randbedingungen ein Unikat darstellt. Es empfehlen sich daher, wann immer möglich, gezielte vorgängige Voruntersuchungen mit den Nachweis, dass die Aufgabenstellung mit den gewählten Verfahren gelöst werden kann.

## Referenzen

- [1] Merkblatt für Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile  
Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Mai 1999
- [2] Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen  
Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Februar 2008 (überarbeitete Fassung)
- [3] Merkblatt über die Anwendung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Zerstörungsfreien Prüfung von  
Betonbauteilen  
Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., März 2011
- [4] Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU)  
ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, 2007
- [5] Zerstörungsfreie Prüfung von Beton und Mauerwerk mit aktiver Thermografie  
Ch. Maierhofer, M. Röllig, R. Arndt – MP Materials Testing 51 (2009) 9
- [6] Empfehlung für die Schadensdiagnose und Instandsetzung von Betonbauwerken, die infolge einer  
Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind  
Arbeitskreis 2 “Bauwerksdiagnose” des DAfStb-Unterausschusses “Alkalireaktion”
- [7] AKR-Schäden bei Bestandesbauten – Zustandsuntersuchungen, Beurteilung und Instandsetzungsmaßnahmen  
Erhaltung von Bauwerken – Technische Akademie Esslingen TAE  
Philipp Truffer, Valtest AG, 2017