

Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 65

bast

Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte

von

Martin Friese
Alexander Taffe
Jens Wöstmann
Andreas Zoëga

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 65

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 86.043/2006 der Bundesanstalt für Straßenwesen:

Ortung von Spanngliedern und Verpressfehlern in Hüllrohren mit Ultraschall-Echo, Impakt-Echo und Radar am Brückenbauwerk Nr. 4511564 im Zuge der A1 bei Hagen/Schwerte

Projektbetreuung

Ralph Holst

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-86509-907-5

Bergisch Gladbach, April 2009

Kurzfassung

Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte

Die Überwachung und Prüfung von Brücken im Zuge von Bundesfernstraßen erfolgt in Deutschland nach der DIN 1076 in festgelegten Zeitintervallen. Im Zuge der „Objektbezogenen Schadensanalyse“ (OSA) hat sich der Einsatz kombinierter zerstörungsfreier Prüfverfahren wie Ultraschall-echo, Impakt-Echo und Radar an mehreren Spannbetonbrücken als geeignet erwiesen, Umfang und Ursache ungeklärter Schäden zuverlässig zu ermitteln. Diese Verfahrenskombination wurde auch für die Untersuchungen an der Spannbetonbrücke im Zuge der Autobahn A1 bei Hagen verwendet. Dazu wurden von der BAM scannende Messwerterfassungssysteme entwickelt, mit denen die Prüfverfahren automatisiert für großflächige Untersuchungen angewendet werden können. Erstmals wurde ein Saugscanner verwendet, der zerstörungsfrei am Bauwerk befestigt werden kann. Der Bericht zeigt, wie die großflächigen Ergebnisse der Untersuchung bildgebend dargestellt werden können. Dem Ingenieur ist es damit möglich, einen Bezug zu Bestandsplanunterlagen herzustellen. Sofern keine Bestandsplanunterlagen existieren, können diese unter bestimmten Randbedingungen aus den Messergebnissen rekonstruiert werden.

Bei der Längsspannung der Brücke handelt es sich um das System Baur-Leonhardt, das aus steifen Blechkästen besteht, in die Litzen eingelegt und zementös verpresst wurden. Über diese Konstruktion lagen noch keine Erfahrungen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren vor. Deshalb wurden Modellrechnungen für verschiedene Verpresszustände durchgeführt, um die zu erwartenden Ergebnisse vorab zu ermitteln.

Die Messergebnisse machen deutlich, dass mit den verwendeten Verfahren der Verlauf der Spannglieder sehr präzise dargestellt werden kann und dass die Lage der Umlenkstellen, die dickeres Blech in zwei Lagen aufweisen, zuverlässig bestimmt werden kann. An der Brücke wurde erstmals großflächig die Phasenauswertung von Ultraschallsignalen zur Ortung von Verpressfehlern durchgeführt. Die Messungen ergaben keine Hinweise auf Verpressfehler. Die Richtigkeit dieser Aussage wurde durch das Öffnen der Spannglieder im Zuge des Abrisses bestätigt.

Abstract

Non-destructive tests on the A1 Hagen/Schwerte bridge construction

Engineering structures in connection with federal highways are tested according to German Standard DIN 1076 in regular intervals. In case of complex damage patterns additional information is necessary by detailed analysis on the object level (OSA). Non-destructive testing methods are part of this further analysis.

Testing methods like ultrasonic echo, impact-echo and radar have proved to be very reliable in several cases to give information about the cause and the amount of damage. The above mentioned combination of testing methods was used for the investigation of a highway bridge of A1 close to Hagen. The data collection was carried out with automated testing systems developed from BAM for large-area testing.

For the first time a vacuum scanner for also non-destructive fixation at the bridge was used. The report shows the imaging of results taken at large scale concrete members. For the engineer the relation between testing results and as-built-drawings is possible. In case of not existing as-built-drawings these might be reconstructed from the testing results under certain boundary conditions.

As tensioning system in longitudinal direction the so-called Baur-Leonhardt system was utilized. It consists of a stiff box of sheets that contains lacing of prestressed steel that have been injected with grouting mortar. For this construction no experience for non-destructive testing existed. Thus model calculations for different grouting quality of the tendon duct were carried out to get an idea about the expected testing results.

The test results proved that the utilised testing methods give very precise the position of the tendon ducts. Also certain areas in the longitudinal tendon duct (box) that indicate two layers of a thicker sheet could be located reliably. For the first time a phase evaluation of the ultrasonic results at a large-scale concrete member was carried out. The results gave no hint for the presence of grouting defects. This was proved by uncovering parts of the tendon ducts in the demolition process.

Inhalt		8 Auswertung und Ergebnisse	23
1 Einleitung	5	8.1 Steg	23
2 Prüfaufgabe und Leistungen	6	8.1.1 Ultraschall-Echo	23
2.1 Prüfaufgabe	6	8.1.2 Radar	25
2.2 Umfang / Leistungen	6	8.1.3 Impakt-Echo	25
3 Untersuchtes Brückenbauwerk	7	8.2 Fahrbahnplatte	31
4 Beschreibung der großflächig angewandten ZfPBau-Verfahren	9	8.2.1 Ultraschall-Echo	31
4.1 Allgemeines	9	8.2.2 Radar	31
4.2 Ultraschallecho	9	8.2.3 Impakt-Echo	32
4.3 Radar	11	8.3 Querträger	33
4.4 Impakt-Echo	12	8.3.1 Ultraschall-Echo	33
4.4.1 Verfahrensprinzip	12	8.3.2 Radar	35
4.4.2 Visualisierung der Messdaten:	12	8.3.3 Impakt-Echo	35
4.5 Verfahrenskombination	13	8.4 Einfüllrohr am Steg	36
5 Verwendete Messtechnik	14	8.4.1 Radar	36
5.1 Automatisierung	14	8.4.2 Impakt-Echo	36
5.2 Ultraschallecho	14	9 Validierungsmessungen	38
5.3 Radar	15	9.1 Allgemeines	38
5.4 Impakt-Echo	16	9.2 Schallgeschwindigkeit an Referenzpunkten	38
6 Modellierung und Simulationsrechnungen	17	9.3 Schallgeschwindigkeit entlang von Messlinien	39
6.1 Allgemeines	17	10 Verifizierung der Messergebnisse	41
6.2 Repräsentative Einzelbilder	17	10.1 Allgemeines	41
6.3 Rekonstruktion der synthetischen Daten	19	10.2 Querspannglied der Fahrbahnplatte	41
7 Durchführung der Messung	22	10.3 Spannglied im Längsträger	41
7.1 Träger 2 (Steg 6)	22	10.4 Einfüllrohr im Längsträger	42
7.1.1 Automatisierte Messungen	22	10.5 Spannglieder im Querträger	42
7.1.2 Manuelle Messungen	22	11 Zusammenfassung	43
7.2 Fahrbahnplatte	22	11.1 Bildgebende Darstellung der inneren Konstruktion	43
7.2.1 Automatisierte Messungen	22	11.2 Ortung von Verpressfehlern	44
7.3 Querträger	22	11.3 Validierungsmessungen	45
7.3.1 Automatisierte Messungen	22	11.4 Ortung von auffälligen Objekten	46
7.3.2 Manuelle Messungen	22	11.5 Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik und Ausblick	46
7.4 Träger 1 (Steg 5)	22	Literatur	46
7.4.1 Manuelle Messungen	22		

Die Realisierung des Forschungsvorhabens basiert auf einer projektgruppenübergreifenden Zusammenarbeit in der Fachgruppe VIII.2 „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin.

Neben den Autoren Dipl.-Ing. Martin Friese, Dipl.-Ing. Alexander Taffe, Dipl.-Ing. Jens Wöstmann und Dipl.-Ing. Andreas Zoëga haben die nachfolgend genannten Mitarbeiter aus dieser Fachgruppe wesentlich zum Zustandekommen des Berichtes beigetragen:

Dr.-Ing. Algernon, Daniel

Dipl.-Ing. Behrens, Matthias

Dipl.-Ing. Borchardt, Kerstin

Dipl.-Ing. Feldmann, Rüdiger

Dr. Krause, Martin

Lange, Marco

Dr.-Ing. Mielentz, Frank

Dipl.-Ing. Milmann, Boris

Dipl.-Ing. Schaurich, Dieter

Schneider, Gerhard

Smith, Sean

Dipl.-Ing. Stoppel, Marcus

Dipl.-Ing. Streicher, Doreen

Dr. Wiggerhauser, Herbert

Dipl.-Geophys. Zacher, Gerhard

und

Dr. Ing. Mayer, Klaus (Universität Kassel)

Vorgang

Mit dem Schreiben der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vom 13.02.2007 (Az.: Z5g-86.0043) wurde die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) beauftragt, an dem Brückenbauwerk Nr. 4511 564 im Zuge der A1 bei Hagen Schwerte unmittelbar vor dessen Rückbau Untersuchungen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren des Bauwesens (ZfPBau-Verfahren) durchzuführen. Im Mittelpunkt des Forschungsvorhabens stand die Ortung von Spanngliedern und Verpressfehlern in Hüllrohren mit Ultraschallecho, Impakt-Echo und Radar.

Im Auftragsschreiben der BASt wird Bezug auf das Schreiben der BAM vom 22.12.2006 und das zugehörige Angebot der BAM, Fachgruppe VIII.2 „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ vom 22.12.2006 genommen.

Das Angebot beinhaltet automatisierte Messungen mit Radar, Impakt-Echo und Ultraschallecho zur Ortung von Spanngliedern sowie eventuell vorhandener unverpresster Hüllrohbereiche und Verdichtungsmängeln. Nach Ausführung der Messungen wurden unmittelbar vor dem Abbruch der Brücke zerstörende Untersuchungen zur Verifizierung der gewonnenen Ergebnisse durchgeführt.

Das Forschungsvorhaben wird durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) finanziert. Das abzubrechende Brückenbauwerk liegt im Bereich des Landesbetriebes Straßenbau Nordrhein-Westfalen, der die BASt beauftragt hatte, die entsprechenden Untersuchungen einzuleiten.

1 Einleitung

Die Überwachung und Prüfung von Brücken im Zuge von Bundesfernstraßen erfolgt in Deutschland nach der DIN 1076 in festgelegten Zeitintervallen. Werden bei solchen Prüfungen Schäden festgestellt, deren Schadensursache bzw. deren Umfang nicht zweifelsfrei festgestellt werden kann, wird im Rahmen der „Objektbezogenen Schadensanalyse“ (OSA) eine gesonderte Prüfung durchgeführt. Die Vorgehensweise ist im zugehörigen Leitfaden der BASt dokumentiert [1]. Bei der OSA nehmen zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau-Verfahren) eine zunehmend wichtigere Rolle ein.

Verschiedene Untersuchungen von Spannbetonbrücken mit Ultraschallecho, Impakt-Echo und Radar an mehreren Spannbetonbrücken zeigen, dass die Anwendbarkeit und Aussagefähigkeit der von der BAM genutzten zerstörungsfreien Echo-Impuls-Verfahren in den vergangenen Jahren wesentlich verbessert wurde [2], [3], [4]. Dazu hat die Entwicklung scannender Messwerterfassungssysteme beigetragen, mit denen die Prüfverfahren automatisiert für flächige Untersuchungen angewendet werden können. Ebenso wurden durch die Weiterentwicklung der Datenbearbeitung und –visualisierung Verbesserungen bei der bildgebenden Darstellung der Ergebnisse und die Vereinfachung der Ergebnisinterpretation erreicht.

Zur Weiterentwicklung und Validierung der Verfahren ist ihre Erprobung an Brückenbauwerken erforderlich, an denen die Ergebnisse der Untersuchungen verifiziert werden können. Aus diesem Grund sind besonders Brücken geeignet, die ohnehin abgebrochen werden sollen. Das untersuchte

Brückenbauwerk im Zuge der A1 bei Hagen /Schwerte wurde von der BASt und dem Landesbetrieb Straßenbau NRW ausgewählt (Bild 1). Aufgrund des bereits erfolgten Abbruchs einer Richtungsfahrbahn (Richtung Dortmund) vor Beginn der hier dokumentierten Untersuchungen und der visuellen Bemusterung der abgebrochenen Spannbetonbauteile wurde von unzureichend verpressten Längs- und Querspanngliedern in dem hier dokumentierten Teil der Brücke (Richtung Bremen) ausgegangen. Diese Vermutung wurde leider im Zuge der Abrissarbeiten nicht bestätigt.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurde neben Scannersystemen, die mit Dübeln am Bauwerk befestigt werden, erstmals ein von der BAM entwickeltes Scannersystem eingesetzt, das mit Saugfüßen durch Unterdruck am Bauwerk befestigt wird.

Die Auswertung von Ergebnissen, die durch scannende Ultraschallmessungen gewonnen wurden, erfolgte im Zusammenhang mit Modellierungen unter Berücksichtigung der vorhandenen Konstruktion. Die Vorgehensweise ist in [5] beschrieben. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse mit Hilfe der Phasenauswertung, deren Grundlagen in [6] beschrieben werden, ausgewertet.

Zur korrekten Auswertung von Ergebnissen und der zuverlässigen Angaben von Bauteildicken und Reflektortiefen ist die Kenntnis der Schallgeschwindigkeit und ihrer Streuung von besonderem Interesse. Für Fundamente wurden bereits umfangreiche Untersuchungen zur Messunsicherheit durchgeführt [8]. Untersuchungen zur Streuung der Schallgeschwindigkeit am hier untersuchten Brückenbauwerk werden in diesem Bericht dokumentiert.



Bild 1 Blick von oben auf die Brücke im Zuge der A1. Im Vordergrund ist das neu erstellte Brückenbauwerk (Fahrtrichtung Köln), im Hintergrund die alte zu untersuchende Brücke (Fahrtrichtung Bremen) zu sehen

Das Konzept der automatisierten ZfPBau-Anwendungen und deren Ergebnisse werden nachfolgend detailliert beschrieben. Die Interpretation der Ergebnisse erfolgt zunächst ohne Beachtung der zerstörenden Untersuchungen.

- 2007-08-08 bis 2007-08-09 Verifizierung der Messergebnisse durch Entnahme von Bohrkernen.

2 Prüfaufgabe und Leistungen

2.1 Prüfaufgabe

Die Aufgabe besteht in der bildgebenden Darstellung und Interpretation von Ergebnissen der eingesetzten zerstörungsfreien Prüfverfahren Ultraschallecho, Impakt-Echo und Radar. Dabei stehen neben der Rekonstruktion der inneren Struktur der untersuchten Bauteile (Lage und Tiefe schlaffer Bewehrung und von Spanngliedern) Aussagen zum Verpresszustand der vorhandenen Spannglieder im Mittelpunkt.

Die Messungen werden mit automatisierten Datenerfassungssystemen, so genannten Baustellenscannern aufgenommen. Zur Datenrekonstruktion mit intelligenten Auswertungsalgorithmen und zur zuverlässigen Angabe Bauteildicken bzw. Hüllrohrtiefen ist die Kenntnis der Schallgeschwindigkeit und ihrer Streuung über das gesamte Bauteil von Bedeutung. An den Längsträgern wurden umfangreiche Messungen zur Bestimmung der Schallgeschwindigkeit und der zugehörigen Unsicherheit durchgeführt, die als Anhaltswerte für weitere Prüfaufgaben dienen.



Bild 2 Ansicht der zu untersuchenden alten Brücke mit Abfanggerüst und Treppenturm (Fahrtrichtung Bremen)

2.2 Umfang / Leistungen

Die nachfolgend aufgeführten Leistungen wurden erbracht:

- 2007-03-28 bis 2007-03-29 Vorabbesichtigung, Planung des Messeinsatzes und Festlegung der Messflächen
- 2007-04-16 bis 2007-04-25 Messeinsatz unter Verwendung von Scannersystemen zum Einsatz an vertikalen Flächen und über Kopf
- 2007-07-23 bis 2007-07-25 Messeinsatz unter Verwendung von Scannersystem zum Einsatz über Kopf. Zu dem Termin war die Verifizierung durch zerstörende Untersuchungen vorgesehen, die jedoch erst später durchgeführt werden konnte, nachdem der Verkehr von der Brücke war.

3 Untersuchtes Brückenbauwerk

Die untersuchte Brücke besteht aus zwei Richtungsfahrbahnen, von denen jede ein separates Bauwerk darstellt. Sie wurde im Jahr 1957 geplant. Zum Zeitpunkt der Untersuchung im Jahr 2007 war das Bauwerk der Fahrbahn Richtung Köln bereits abgerissen. Die Untersuchungen erstrecken sich nur auf das Bauwerk der Fahrbahn Richtung Bremen. Bild 1 zeigt die Brücke im April 2007; im Vordergrund ist die bereits neu hergestellte Fahrbahn Richtung Köln zu sehen, im Hintergrund das alte Brückenbauwerk. Bild 2 zeigt die alte Brücke mit Blick auf das die Bahngleise überspannende Feld und das für den bevorstehenden Abriss aufgebaute Abfanggerüst. Des Weiteren ist der Treppenturm zu sehen, der den Zugang zu den Messflächen ermöglichte.

Die Brücke ist als Dreifeldbrücke mit schiefwinkligen Plattenbalken ausgeführt. Ein Feld (Feldweite 27,27 m) überspannt die Kreisstraße K21, das mittlere Feld (Feldweite 35,05 m) die Bahnstrecke und ein Feld (Feldweite 27,27 m) befindet sich im Bereich der Baustelleneinrichtung. Der schiefwinklige Plattenbalken besteht aus fünf Stegen und der an beiden Rändern auskragenden Fahrbahnplatte, die mit den Stegen monolithisch verbunden ist. Die Stege werden durch je einen Querträger je Feld unterbrochen. Dieser Querträger läuft parallel zur Übergangskonstruktion. Bild 4a zeigt einen Ausschnitt des Grundrisses des Plattenbalkens. In Bild 4b ist der Längsschnitt der Brücke zu sehen. Bild 4c zeigt einen Querschnitt durch den Plattenbalken. Die Lage der untersuchten Bauteile (Längsträger 1, 2 und 3¹ sowie Fahrbahnplatte zwischen Längsträger 1 und 2 oberhalb der Bahntrasse) ist in den Bildern eingezeichnet. Die untersuchten Längsträger haben eine planmäßige Dicke von 35 cm und eine Gesamthöhe von 145 bis 155 cm. Die Dicke der Fahrbahnplatte beträgt außerhalb der Voute nach Bohrkernentnahme 20 cm. Die Dicke des Querträgers wird mit 60 cm angegeben.

Die Stege sind in Längsrichtung mit dem System **Baur-Leonhardt** vorgespannt. Die Fahrbahnplatte ist in Querrichtung mit **Leoba-Spanngliedern** vorgespannt. Für die Querträger sind in den vorliegenden Planunterlagen keine Spannglieder eingezeichnet. Das von Fritz Leonhardt und Willi Baur entwickelte Spannsystem wurde in Deutschland ab 1949 verwendet und besteht aus steifen Blech-

kästen, in die Litzen oder Spanndrähte einlegt und mit zementösem Füllgut verpresst wurden. Das hier verwendete System besteht aus Blechkästen mit B/H von 123/135 mm, in die 11 Litzen nebeneinander in 12 Reihen übereinander verlegt wurden. Jede Litze besteht aus 6 Drähten $\varnothing 3,06$ mm und 1 Litze $\varnothing 3,15$ mm (Felten und Guillaume, Karlswerk, Köln, Bruchfestigkeit 180 kg/mm²). Der Blechkasten besitzt zwischen den Umlenkstellen eine Wanddicke von 1 mm. An den Umlenkstellen selbst beträgt die Wanddicke 4 mm. Die Besonderheit dieses Verfahrens besteht im geringen Flächenanteil des Verpressmörtels von rd. 10% und der Konzentration großer Vorspannkkräfte in nur einem Spannkanal.

Untersuchungen durch die BAST und Straßen NRW nach Abriss des Bauwerks der Fahrtrichtung Köln deuteten auf umfangreiche Verpressfehler vorwiegend in den Querspanngliedern hin (Bild 3), so dass die Richtungsfahrbahn Bremen zur Untersuchung ausgewählt wurde.



Bild 3 Querspannglieder der Richtungsfahrbahn Köln

¹ Die Träger 1, 2 und 3 werden in den Bestandsplänen auch als Steg 5, 6 und 7 bezeichnet

4 Beschreibung der großflächig angewandten ZfPBau-Verfahren

4.1 Allgemeines

Für die Analyse der inneren Bauteilstrukturen wurden drei zerstörungsfreie Prüfverfahren angewendet:

- Ultraschallecho
- Radar
- Impakt-Echo

Bei den drei Verfahren handelt es sich um Echo-Verfahren, d. h. der Energieeintrag und die Erfassung der vom Bauteil reflektierten Energie erfolgen von derselben Seite. Für die zerstörungsfreien Untersuchungen ist somit eine einseitige Zugänglichkeit der Bauteile ausreichend.

Radar ist ein elektromagnetisches Verfahren, mit dem schnell und zuverlässig Bauteildicken bestimmt und schlaffe Bewehrung, Spannkäme und größere Hohlstellen geortet werden können.

Die beiden akustischen Verfahren, Impakt-Echo und Ultraschallecho, werden ebenfalls zur Dickenbestimmung und zur Ortung der Spannkäme angewendet. Darüber hinaus sollen mit den Verfahren die Bauteile auf eventuelle Verdichtungsmängel im Betongefüge und vor allem auf gegebenenfalls vorhandene Verpressfehler in den Spannkämen untersucht werden.

Durch Automatisierung der Messverfahren konnten große Messflächen mit allen drei Verfahren vergleichend untersucht werden. Als Neuentwicklung wurde ein Scanner eingesetzt, dessen Füße durch Unterdruck am Bauwerk befestigt werden können. Dieser sogenannte „Saugscanner“ wurde über Kopf eingesetzt.

Im Folgenden werden die drei angewendeten ZfPBau-Verfahren beschrieben.

4.2 Ultraschallecho

Für Messungen mit dem Ultraschallecho-Verfahren werden auf der Bauteiloberfläche durch eine elektrische Pulsanregung punktuell akustische Schallimpulse im Frequenzbereich von 20 bis 200 kHz erzeugt [3]. Die Impulse breiten sich im Bauteil aus und werden an innenliegenden Grenzschichten (durch Lufteinschlüsse, Bewehrungsstahl, Gesteinskörnungen) bzw. an der Bauteilrückseite gestreut, reflektiert und gebeugt. Für die Wellenausbreitung ist die akustische Impedanz der unterschiedlichen Materialien maßgebend. Die Reflexion der Schallwellen ist beim Übergang zu Luft

am größten. Als Messergebnis werden die Intensitäten der zur Bauteiloberfläche zurück reflektierenden Schwingungsimpulse über die Zeit erfasst. Stellt man für eine Punktmessung diese Intensität über der Zeit dar, spricht man von einem A-Bild.

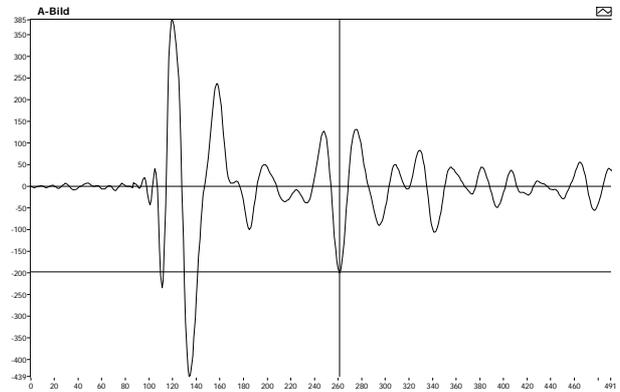


Bild 5 Ultraschall-A-Bild (aus Messfeld Fahrbahnplatte)

Werden mehrere Ultraschallmessungen entlang einer Linie durchgeführt und stellt man die Amplituden der dabei erhaltenen A-Bilder entlang einer Messstrecke farbcodiert dar, so entsteht ein so genanntes B-Bild. Da Ultraschall-Prüfköpfe für die Anwendung im Beton typischerweise keinen fokussierten Schallstrahl sondern ein geöffnetes Schallbündel ausstrahlen, werden auch Objekte, die sich seitlich der aktuellen Messposition befinden, erfasst und erscheinen im B-Bild als Hyperbeln.

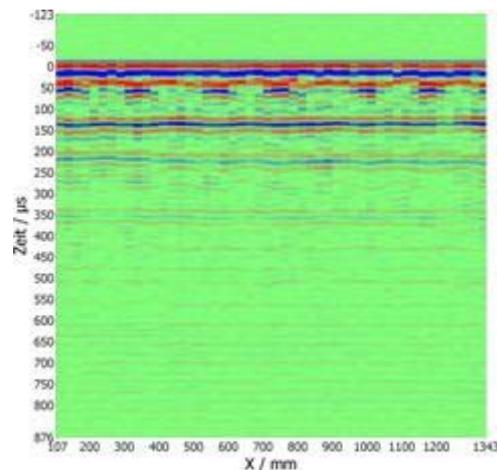


Bild 6 Ultraschall-B-Bild (aus Messfeld Fahrbahnplatte). Die Querspannglieder sind als Hyperbeln sichtbar

Unter Berücksichtigung der im Bauteil vorherrschenden Schallgeschwindigkeit können aus den gemessenen Laufzeiten die Messtiefen reflektierender Objekte bestimmt werden. Bei der flächigen Anwendung der Verfahren erfolgen zahlreiche Punktmessungen in einem vorher gewählten Raster.

Zur Verbesserung des Signal-/Rausch-verhältnisses werden die Daten mit 3D-SAFT-Programmen rekonstruiert. Die Rekonstruktion der Daten wurde an der BAM sowie der Universität Kassel durchgeführt. An der BAM kamen hierbei Programme zum Einsatz, die am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfung IZfP (für mit Scannern aufgenommene Messdaten) sowie an der Universität Kassel (für mit dem Linienarray aufgenommene Daten) entwickelt wurden. Aus den in einem zweidimensionalen Raster an der Oberfläche aufgenommenen Ultraschallechosignalen erfolgt unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit die Rückrechnung auf die dreidimensionale Reflektorverteilung im Prüfobjekt. Bei der Rekonstruktionsberechnung dieses Laufzeit-SAFT-Algorithmus werden die Ultraschallsender und -empfänger getrennt voneinander berücksichtigt. Die Interpretation der SAFT-Ergebnisse erfolgt anhand von SAFT-B/C-Bildern bzw. Projektionen.

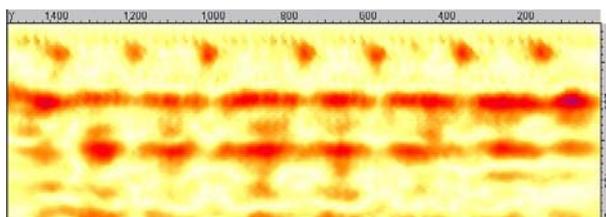


Bild 7 SAFT-B-Bild (Messfeld Fahrbahnplatte). Deutlich erkennbar sind die Querspannglieder und die Rückwand.

Das Ultraschallecho-Verfahren eignet sich aufgrund der zu Grunde liegenden Wellencharakteristik zur Bestimmung von Bauteildicken, zur Ortung von Spanngliedern sowie zur Ortung von Verpressfehlern in Spanngliedern und von ausreichend großen Kiesnestern im Konstruktionsbeton [5].

Für die Erkennung von Verpressfehlern wurden bisher zwei Kriterien angewandt. Zum einen ist die Amplitude des reflektierten Signals in unverpressten Bereichen höher, zum anderen kommt es an Lufteinschlüssen zu Abschattungseffekten, so dass dort neben dem Eintrittsecho des Ultraschallsignals in das Hüllrohr keine Signale aus tieferen Bereichen der Hüllrohr-Rückseite zu beobachten sind.

Beide Kriterien konnten sowohl in Laborversuchen an Probekörpern als auch in Praxisanwendungen beobachtet und verifiziert werden, allerdings zeigte sich, dass die Deutlichkeit der zugrunde liegenden Effekte von vielfältigen Randbedingungen abhängt.

Eine verbesserte Aussagesicherheit lässt sich durch ein neues Kriterium erreichen, das auf der Beobachtung der Phasenlage des reflektierten Signals beruht [6]. Diese Methode nutzt den Effekt, dass sich die Reflexion von Ultraschallwellen beim Übergang zu einem akustisch dichteren Medium (z.B. von Beton zu Stahl) anders darstellt als beim Übergang zu einem akustisch dünneren Medium (z.B. von Beton zu Luft). Zwischen beiden besteht unter idealen Bedingungen ein Phasenunterschied von 180° .

4.3 Radar

Radar wird im Bauwesen in verschiedenen Bereichen eingesetzt. In der Richtlinie B10 der DGZfP werden Anwendungsbeispiele zur *Objektortung und Feuchteverteilung in Mauerwerk, Spannglied- und Bewehrungsortung, Ortung von Ankern in Betonfahrbahnen, Belagschichtdickenmessung an Brücken sowie Baugrunderkundung* beschrieben. Dort werden ausführlich die Grundlagen aufgezeigt, die auf der Aussendung elektromagnetischer Wellen und der Einleitung in das zu untersuchende Bauteil beruhen. In der Baupraxis werden zur Untersuchung von Betonbauteilen Antennen mit Mittenfrequenzen im Bereich von 500 MHz bis 2 GHz verwendet. Die Wellenausbreitung im Bauteil hängt von der Verteilung der dielektrischen Eigenschaften ab. Auf ihrem Weg wird die Welle an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften gestreut und reflektiert, wie in Bild 8 dargestellt.

An der Grenzfläche Luft/Beton (Bauteilrückwand, Fehlstelle) entstehen Reflexionen. An der Grenzfläche Beton/Metall (schlaife Bewehrung, Hüllrohr) treten Totalreflexionen auf. Die mit der Empfangsantenne aufgenommenen Reflexionen und Streuungen werden als Funktion der Laufzeit t digital aufgezeichnet (A-Bild). Ist die Dielektrizitätszahl des untersuchten Baustoffs und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen bekannt, lässt sich aus der Laufzeit der Reflexionen die Tiefe der Reflektoren (Rückwand, Bewehrung, Grenzfläche/Fehlstelle) ermitteln. Stellt man die Amplituden mehrerer A-Bilder entlang einer Messstrecke farbcodiert dar, so entsteht ein Radargramm (B-Bild). Die Reflexionen der Bewehrungsstäbe sind im B-Bild an den typischen Reflexionshyperbeln zu erkennen.

Die entlang einer Linie aufgenommenen Radar-daten werden während der Messungen auf dem Display des Radargerätes angezeigt. In der als Radargramm bezeichneten Darstellung sind die Amplituden und Phasen der empfangenen elektromagnetischen Impulse über die Zeit in Form von Grauwerten abgebildet. Aufgrund des Abstrahlwinkels der Radar-Antenne erscheinen die Reflexionen an metallischen Einbauteilen im Radargramm als Diffractionshyperbeln. Ihre Entstehung ist im Bild 9 schematisch aufgezeigt.

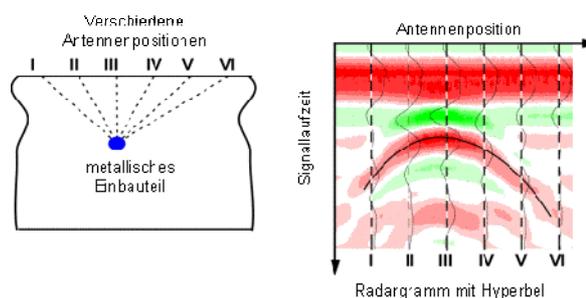


Bild 9 Typisches Reflexionssignal eines metallischen Einbauteiles im Radargramm (Diffractionshyperbel).

Die tatsächliche laterale Position der Reflektoren liegt im Scheitelpunkt der Hyperbeln und kann aufgrund des unmittelbaren Bezugs zu den Koordinaten der Messfläche unmittelbar angegeben wer-

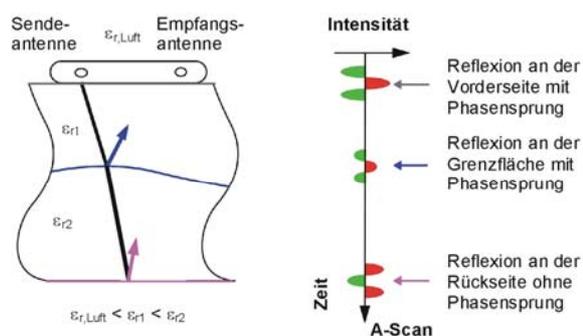


Bild 8 Prinzip des Impulsradars: Ausbreitung und Reflexion einer Impulswelle

den. Der Abstand der Reflektoren von der Messoberfläche kann erst bestimmt werden, wenn die Laufzeitachse der Radargramme unter Berücksichtigung der Dielektrizitätskonstante ϵ_r in eine Tiefenachse umgerechnet wurde. Zur Tiefenkalibrierung ist die im untersuchten Bauteil vorherrschende Dielektrizitätskonstante ϵ_r bzw. die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit anhand von Reflektoren mit bekannter Betondeckung oder aus den Öffnungswinkeln der Diffractionshyperbeln zu bestimmen.

Die Überlagerung verschiedener Diffractionshyperbeln kann zu Fehlinterpretationen führen. Untersuchungen an anderen Ingenieurbauwerken haben gezeigt, dass die Lesbarkeit der Ergebnisdarstellung, die Aussagezuverlässigkeit und die Informationsdichte bei Radar-Untersuchungen durch 3D-Rekonstruktionsberechnungen und Datenfusion deutlich gesteigert werden kann.

Für die 3D-Rekonstruktionsberechnungen werden, die in parallel geführten Messspuren aufgenommenen Daten in einen Datensatz zusammengefügt und anschließend die Messdaten auf die Reflektorverteilung im Prüfobjekt zurückgerechnet. An der BAM wird für die 3D-Rekonstruktionsberechnungen bei Radar ein 3D-FT-SAFT-Programm der Universität Kassel genutzt. Die Daten werden für die Berechnung mit Hilfe der Fourier Transformation (FT) in den Frequenzbereich überführt. Im Ergebnis werden die in den Radargrammen abgebildeten Diffraktionshyperbeln unter Annahme einer konstanten Signalausbreitungsgeschwindigkeit und unter Berücksichtigung des Öffnungswinkels der Radarantenne (i. d. R. 45°) in ihrem Scheitelpunkt fokussiert. Die Fokussierung erfolgt auch für Hyperbeln, die durch Abschattung nur unvollständig im Radargramm angezeigt werden.

4.4 Impakt-Echo

4.4.1 Verfahrensprinzip

Das Impakt-Echo-Verfahren (IE) ist ein akustisches Verfahren, das mit Frequenzen im hörbaren Schallbereich arbeitet. Die Analyse der Daten findet nicht im Zeitbereich durch eine Laufzeitmessung statt, sondern im Frequenzbereich.

An der Bauteiloberfläche bewirkt der Einschlag eines kleinen Hämmerchens oder einer Stahlkugel einen mechanischen Puls, wodurch eine transiente Schallwelle erzeugt wird, die sich im Bauteil ausbreitet. An Grenzflächen, Flächen, die Stoffe unterschiedlicher Dichte und E-Moduln trennen, wird ein

Teil der Schwingungsenergie reflektiert; die Reflexion wird mit wachsendem Dichte- und E-Modulunterschied und daraus folgendem Schallgeschwindigkeitsunterschied stärker.

Die Stoßwelle wird zwischen der Rückwand bzw. der Störung und der Oberfläche mehrfach reflektiert. Der Puls ist eine breitbandige Anregung, die einen gewissen Frequenzbereich mit Wellen unterschiedlichster Wellenlängen, je nach Auswahl des Hämmerchens, umfasst. Die einfallende und die reflektierte Welle überlagern sich mit den weiteren Reflexionen der Vorder- und Rückseite. Die Wellenlänge, die ein bestimmtes Vielfaches des Abstands der Grenzflächen ist, bildet eine stehende Welle. Die Wellenlängen, die kein bestimmtes Vielfaches des Abstandes sind, löschen sich gegenseitig aus. Diese Schwingungen werden an der Bauteiloberfläche mittels eines Schwingungsmessers aufgenommen. Um die Messdaten interpretieren zu können, wird das Messsignal aus dem Zeitbereich in den Frequenzbereich transformiert und hinsichtlich seiner maßgeblichen Frequenz (f) ausgewertet. Aus der Beziehung $d=c/2f$ ergibt sich bei bekannter Schallgeschwindigkeit (c) die Dicke (d) des Bauteils.

4.4.2 Visualisierung der Messdaten:

Die größte Einschränkung ist bislang die Tatsache, dass IE ursprünglich ein Punktmessverfahren ist. Zudem muss das erzeugte Signal ausreichend Energie im entsprechenden Frequenzbereich beinhalten, so dass es zu der beschriebenen Vielfachreflexion kommen kann, ohne dass das Signal zu

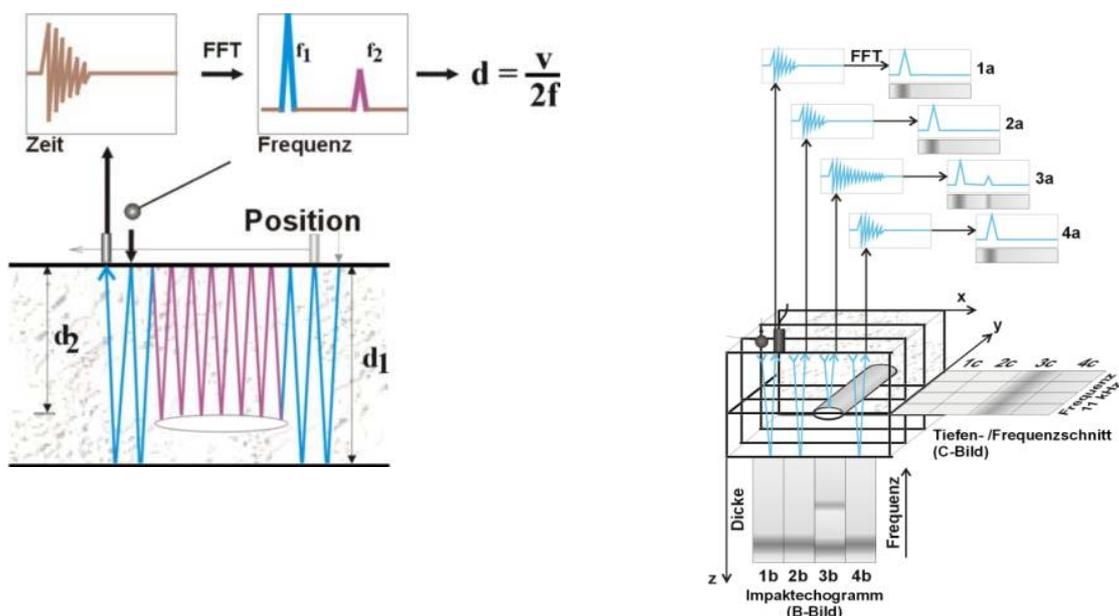


Bild 10 links: Funktionsweise des Impact-Echo-Verfahrens
rechts: Datenvisualisierung von 1D-, 2D- und 3D-Datensätzen des Impact-Echo-Verfahrens

abgeschwächt ist. Demnach müssen passende Sensoren und Gerätschaften verfügbar sein, um die Signale in dem gewünschten Frequenzbereich zu erzeugen und zu messen. Zur Lösung einiger dieser Probleme ist in der BAM ein automatisiertes, scannendes Impakt-Echo-Verfahren mit Software zur Echtzeitdarstellung der Messdaten entwickelt worden. Die Betrachtung zweidimensionale Querschnitte (B-Bild oder Impaktechogramm) eines Bauteils wurde dadurch ermöglicht.

Die Messwertaufnahme erfolgt entlang festgelegter Linien an äquidistanten Punkten. Durch die Transformation des Zeitsignals in das Frequenzspektrum sind die vorherrschenden Frequenzen anhand der Maximalamplituden zu identifizieren. Werden die einzelnen Frequenzspektren nun nicht als Kurven dargestellt, sondern in Abhängigkeit von der Größe der vorhandenen Amplituden als abgestufter Grau-Weiß-Streifenplot, erhält man auf diese Weise aneinander gehängt das Impaktechogramm des untersuchten Bereiches (eine Quasi-Sicht auf den Querschnitt). Diese vertikalen Schnitte durch das untersuchte Element haben auf der horizontalen Achse die Position der Prüfeinheit auf der Oberfläche sowie auf der vertikalen Achse die Frequenz oder die Reflektortiefe. Diese Art der Datenvisualisierung erleichtert die Auswertung, da hier auch gleichmäßige Muster im Echogramm, die sich erst durch das Zusammenfügen der einzelnen Messpunkte ergeben, sichtbar gemacht werden.

Ein weiterer Schritt in der Auswertung der Daten ist die Analyse des durch Kombination mehrerer paralleler Messlinien entstehenden dreidimensionalen Datensatzes. Diese Darstellung ermöglicht nun zweidimensionale Tiefenschnitte durch den Prüfkörper, was zu einer erweiterten Aussagefähigkeit der Auswertung führt. Dadurch können vorhandene Strukturen sichtbar gemacht werden, die weder im A- noch im B-Bild zu identifizieren sind.

4.5 Verfahrenskombination

Ziel der Datenfusion ist es, die Interpretation der Messergebnisse zu vereinfachen und die Aussagezuverlässigkeit zu erhöhen.

Mit Hilfe verschiedener Operationen werden die einzelnen Ergebnisse von gleichen oder aber auch von unterschiedlichen Messverfahren überlagert. Abhängig von der Wahl der Operationsalgorithmen werden die für den Bearbeiter wesentlichen Informationen in einem Datensatz komprimiert.

Sowohl Rohdaten als auch bearbeitete, wie z. B. SAFT-rekonstruierte Datensätze können fusioniert werden. Die Datensätze müssen zuvor in ein definiertes Referenzsystem überführt werden. Das

Referenzsystem legt die Auflösung, die Größe und das Koordinatensystem des Fusionsdatensatzes fest. Alle zu fusionierenden Datensätze müssen in ihren geometrischen Eigenschaften diesem Referenzsystem angepasst werden.

Unmittelbar vor der Fusion der Datensätze ist es möglich, die Signale je nach Bedarf mit dem Fusionsprogramm zu bearbeiten. Z. B. kann jeder Datensatz mit einer linearen oder nicht linearen Funktion tiefenabhängig gewichtet werden, um den unterschiedlichen Eigenschaften der Verfahren bezüglich der maximalen Eindringtiefe bedingt durch Absorption, Reflexion und Streuung Rechnung zu tragen. Stark verrauschte Datensätze können sowohl im Zeitbereich als auch räumlich mit unterschiedlichen Filtern geglättet werden. Außerdem ist es möglich, nur die Änderungen der Amplituden in z-Richtung bei der Fusion zu berücksichtigen.

Die eigentliche Fusion basiert auf der Überlagerung der verschiedenen Datensätze mittels einfacher mathematischer Operationen. Neben Addition, Subtraktion, Division und Durchschnitt können auch ausschließlich die maximalen Werte aller Datensätze im Fusionsdatensatz berücksichtigt werden. Des Weiteren existiert die Möglichkeit, zwei Datensätze mit einem vorher definierten, richtungsorientierten Fokus zu kombinieren. Mit dieser Operation ist es möglich, vorwiegend in eine Richtung ausgedehnte Strukturen wie Bewehrungsstäbe oder auch Spannkäme richtungsabhängig herauszufiltern. Nicht zuletzt können natürlich alle erwähnten Operationen beliebig miteinander kombiniert werden [12].

5 Verwendete Messtechnik

5.1 Automatisierung

Seit 2003 wurden zur Verbesserung der Messwerterfassung verschiedene Scannersysteme in der BAM entwickelt, die automatisierte Flächenmessungen mit Ultraschallecho, Impakt-Echo und Radar an Ingenieurbauwerken gestatten. Von Seiten der Mechanik handelt es sich um Schienen-Wagen-Systeme, mit denen verschiedene Prüfsensoren zweidimensional über die von Schienen eingeschlossene Fläche verfahren werden können.



Bild 11 Klassisches Scannersystem, bestehend aus zwei Linearantrieben am Steg der Brücke

An der Brücke Hagen-Schwerte wurden zwei verschiedene Scannersysteme eingesetzt. Zum einen ein klassisches, sehr flexibles System, das durch Ankerbolzen am Bauwerk befestigt wird (Bild 11). Zum anderen ein neuer Scanner, der durch Erzeugung von Unterdruck an vier Saugfüßen am Bauteil gehalten wird. Der erforderliche Unterdruck von 0,8 bar wird mit Hilfe einer Venturipumpe erzeugt, die permanent mit einem Druck von 3-4 bar zu versorgen ist. Das System von der Größe 1,60 m x 1,20 m ist in Bild 12 dargestellt.

Das Verfahren, Positionieren, Andrücken der Messköpfe (Ultraschall-Echo und Impakt-Echo) sowie die Auslösung der Messungen und die Messwerterfassung werden durch mehrere von der BAM entwickelte Programme gesteuert, die über ein Netzwerk miteinander kommunizieren.



Bild 12 Unterdruck-Scanner mit zerstörungsfreier Befestigung am Bauwerk beim Einsatz an der Unterseite der Fahrbahnplatte

5.2 Ultraschallecho

In Hagen wurde für die automatisierten Messungen am Bauwerk ein modifiziertes Ultraschallarray mit 24 Punktkontaktprüfköpfen der Fa. ACSYS (Russland) als Sensor eingesetzt. Die Größe dieses Arrays beträgt $6 \times 10 \text{ cm}^2$ und der Abstand zwischen den Prüfkopfspitzen jeweils 2 cm.

Die Prüfköpfe haben eine breitbandige Charakteristik bei einer Mittenfrequenz von 50 kHz. Es handelt sich um Transversalwellenprüfköpfe, von denen jeweils 12 parallel als Sender und die anderen 12 parallel als Empfänger arbeiten. Durch die Parallelschaltung der Prüfköpfe wird eine höhere Schalldruckamplitude sowie ein geringerer Öffnungswinkel des Schallbündels gegenüber einem Einzelprüfkopf erreicht.

Die Punktkontaktprüfköpfe weisen einen großen Vorteil gegenüber den bisher verwendeten Prüfköpfen auf. Koppelmittel, wie z. B. Vaseline oder Glycerin, sind nicht erforderlich.

Während der Messungen muss der Messkopf an die Messoberfläche angedrückt und ein möglichst konstanter Andruck aller 24 Prüfköpfe realisiert werden. Die Einzelprüfköpfe sind federnd gelagert, wodurch gewisse Unebenheiten der Oberfläche (laut Herstellerangaben darf die Rauigkeit der Oberfläche bis zu 8 mm betragen) ausgeglichen werden können.

Die Ultraschallecho-Messköpfe waren so angebracht, dass die ausgesendeten Transversalwellen parallel zu den jeweils zu untersuchenden Spannungsgliedern polarisieren.

Bei den automatisierten Ultraschallecho-Messungen wird vom Messrechner ein Sendeimpuls ausgelöst. Die durch die Empfangsprüfköpfe um-

gewandelten Spannungsimpulse werden im Messkopf verstärkt und zur A/D-Umwandlung an die ADU-Baugruppe des Messrechners weitergeleitet.

Zusätzlich zu den automatisierten Messungen wurden manuelle Messungen durchgeführt. Hierbei kamen die kommerziell erhältlichen Ultraschallgeräte ACSYS A1220 Monolith und A1040 Polygon zum Einsatz.



Bild 13 Ultraschallgerät ACSYS A1220 mit Prüfkopf

Das Ultraschallmessgerät A1220 (Bild 13) nutzt als Sensor dasselbe Prüfkopfarray, das auch – in einer leicht modifizierten Version – am Scanner zum Einsatz kam.

Im Bestreben, auch bei Handmessungen eine bildgebende SAFT-Auswertung zu ermöglichen und die Mess- und Auswertezeiten zu verkürzen, wurde von BAM und ACSYS in Kooperation das Messgerät A1040 Polygon (Bild 14) entwickelt. Es nutzt das Funktionsprinzip eines multistatischen Linienarrays. Mehrere (8 bis 16, in der zum Einsatz gekommenen Ausbaustufe 10) Prüfkopfmodule sind hintereinander angeordnet.

Auf jedem dieser Prüfkopfmodule befinden sich 4 Transversalwellen-Prüfköpfe, die ausgesandten Wellen sind senkrecht zur Array-Achse polarisiert. Eine Besonderheit dieses Linienarrays ist, dass die Analog-Digital-Umsetzung direkt in den Prüfkopfmodulen stattfindet. Zwischen den Prüfkopfmodulen und dem ins Gerät eingebauten Steuerungsmodul werden nur digitale Daten übertragen, ebenso zwischen Steuerungsmodul und dem per Netzkabel mit dem Linienarray verbundenen Computer.

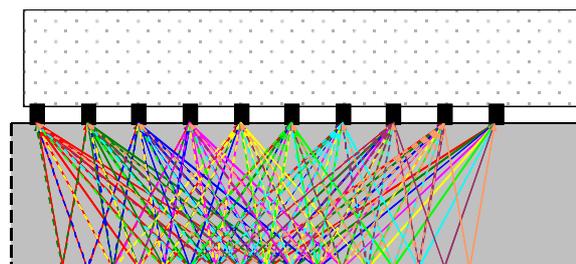


Bild 14 Ultraschall-Linienarray (oben) mit den 10 Prüfkopfmodulen, Messprinzip (unten)

Während der Messung werden die Prüfkopfmodule sequentiell so angesteuert, dass jedes Modul genau einmal als Sender (wobei alle anderen Module als Empfänger agieren) und sonst als Empfänger arbeitet. So erhält man schon bei der Messung an einer Stelle gleich eine Vielzahl von Kurven mit verschiedenen Sender- und Empfängerpositionen, aus denen mit geeigneter Software sehr schnell ein zweidimensionales B-Bild rekonstruiert werden kann. Führt man mehrere Messungen entlang einer Linie durch, wobei das Array parallel verschoben wird, lassen sich aus den so gewonnenen Daten schnell ein dreidimensionales Abbild des Rekonstruktionsraumes bzw. entsprechende B- und C-Bilder erzeugen.

5.3 Radar

Die Radaruntersuchungen am Brückenbauwerk erfolgten mit dem kommerziellen SIR-20 Radargerät von der Firma GSSI (USA). Zur Erzielung einer geeigneten Auflösung wurden die Messungen mit einer 1,5 GHz-Antenne vom gleichen Hersteller eingesetzt. Die Polarisationsrichtung des von der Antenne abgestrahlten elektrischen Feldes war senkrecht zur Messrichtung eingestellt. Alle Messungen wurden im Echo-Betrieb durchgeführt. Jedes Messfeld wurde mit jeweils horizontalen und vertikalen Messspuren mit einem Spurbestand von 5 cm untersucht. Der Messpunktbestand entlang einer Messlinie betrug 2,5 mm. Der Abstand zwischen Antenne und Bauteiloberfläche betrug zwischen 0,5 cm und 1,5 cm.

5.4 Impakt-Echo

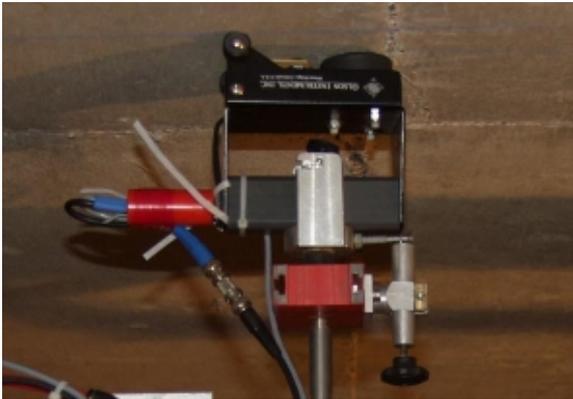


Bild 15 IE-Messkopf von Olson Instruments

An der Brücke der Autobahn 1 in Hagen wurde ein Messkopf der Firma Olson (Olson Instruments INC, IE1, Bj. 1998) verwendet (Bild 15).

Die Anregung erfolgt über einen elektromagnetisch beschleunigten Stahlimpaktor, der die Form einer Halbkugelscheibe mit 3 mm Durchmesser hat. Die Kontaktzeit des Stahlimpaktors auf der Messoberfläche beträgt 0,067 ms und Frequenzen von 1 kHz bis ca. 20 kHz werden angeregt. Bei einer Wellengeschwindigkeit in Beton von 4000 m/s sind somit Wellenlängen von minimal 20 cm zu erwarten und damit entspricht die minimal zu detektierende Dicke 10 cm.

Vom Stahlimpaktor 4 cm entfernt befindet sich ein Beschleunigungssensor. Mit diesem werden die empfangenen akustischen Wellen in elektrische Signale umgewandelt. Das Signal wird durch einen Verstärker entsprechend verstärkt und in einer Messwerterfassungskarte digitalisiert. Die digitalisierten Daten werden vom Messwerterfassungsprogramm auf dem Mess- und Steuerrechner gespeichert sowie zu einer sofortigen vorläufigen Analyse bereitgestellt. Von der Scannersteuer-Software werden die jeweiligen Ortskoordinaten an das Messwerterfassungsprogramm geliefert, sodass ein ortsaufgelöster Datensatz abgespeichert wird.

Bei den Impakt-Echo-Messungen wurden die Messwerte entlang von Linien aufgenommen, wobei der Linienabstand gleich dem Abstand zwischen zwei Messpunkten auf einer Linie war. Es wurde mit einer Schrittweite von 2,5 cm gemessen. Die Messung fand an jedem Punkt drei mal statt, anschließend wurden die Messungen addiert, um das Rauschen, da es beliebig auftritt, zu unterdrücken, und den Einfluss von Fehlmessungen zu minimieren.

6 Modellierung und Simulationsrechnungen

6.1 Allgemeines

Simulationsrechnungen sind insbesondere dann sinnvoll, wenn keine Erfahrungen mit den zerstörungsfreien Prüfverfahren für ein Vorspannsystem vorliegen, was mit dem vorhandenen System **Baur-Leonhardt der Fall ist**. Um die Interpretation der am Steg gewonnenen Ultraschall-Messdaten zu erleichtern und die Messung besser an das Prüfobjekt anzupassen, wurden im Vorfeld der Messungen umfangreiche Simulationsrechnungen an der Universität Kassel durchgeführt. Des Weiteren führen die geometrischen Verhältnisse (vordere und rückwärtige Hüllkastenwand laut Bestandsunterlagen nahezu in den Dreittelpunkten der Stegbreite) dazu, dass bei plangerechter Herstellung die Reflexionen von der Rückseite des Hüllkastens sowie der Bauteilrückwand zeitlich mit den Mehrfachreflexionen von der Vorderseite des Hüllkastens zusammenfallen.

Für die Simulationsrechnungen wurden drei Fälle modelliert:

1. guter Verpresszustand
2. unverpresst
3. guter Verpresszustand mit asymmetrischer Litzenanordnung

Um klarer erkennen zu können, welche Signalanteile auf Mehrfachreflexionen von der Vorderseite des Hüllkastens zurückgehen und bei welchen es sich um echte Reflexionen von tiefer liegenden Reflektoren (bspw. Rückseite des Hüll-

kastens, Bauteilrückwand) handelt, wurde der Hüllkasten im Modell jeweils einmal zentrisch (Betondeckung beidseitig 12 cm) und einmal exzentrisch (Betondeckung auf der Seite, von der gemessen wurde, 9,5 cm) angeordnet (Bild 16).

Es wurden Simulationsrechnungen mit jeweils 35 verschiedenen Prüfkopfpositionen durchgeführt, anschließend wurde mit den so gewonnenen synthetischen Daten eine Rekonstruktion mit dem FT-SAFT-Algorithmus durchgeführt. Damit wurde erreicht, dass ein Vergleich zwischen realen Messdaten und Simulations-Ergebnis nicht nur auf Basis der A-Bilder sondern auch anhand der rekonstruierten Daten möglich ist.

6.2 Repräsentative Einzelbilder

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Simulationsrechnungen kurz vorgestellt. Hierfür wurde repräsentativ jeweils der Fall ausgewählt, in dem der sendende Prüfkopf zentrisch über dem Hüllkasten steht.

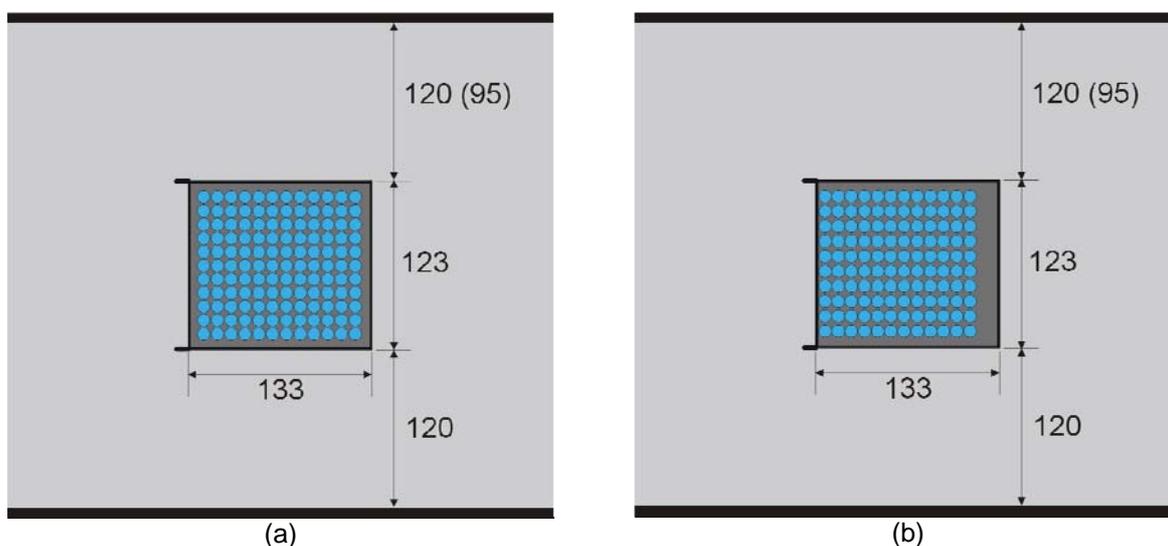


Bild 16 Geometrie des für die Simulationsrechnungen verwendeten Modells: symmetrische (a) und asymmetrische (b) Litzenanordnung

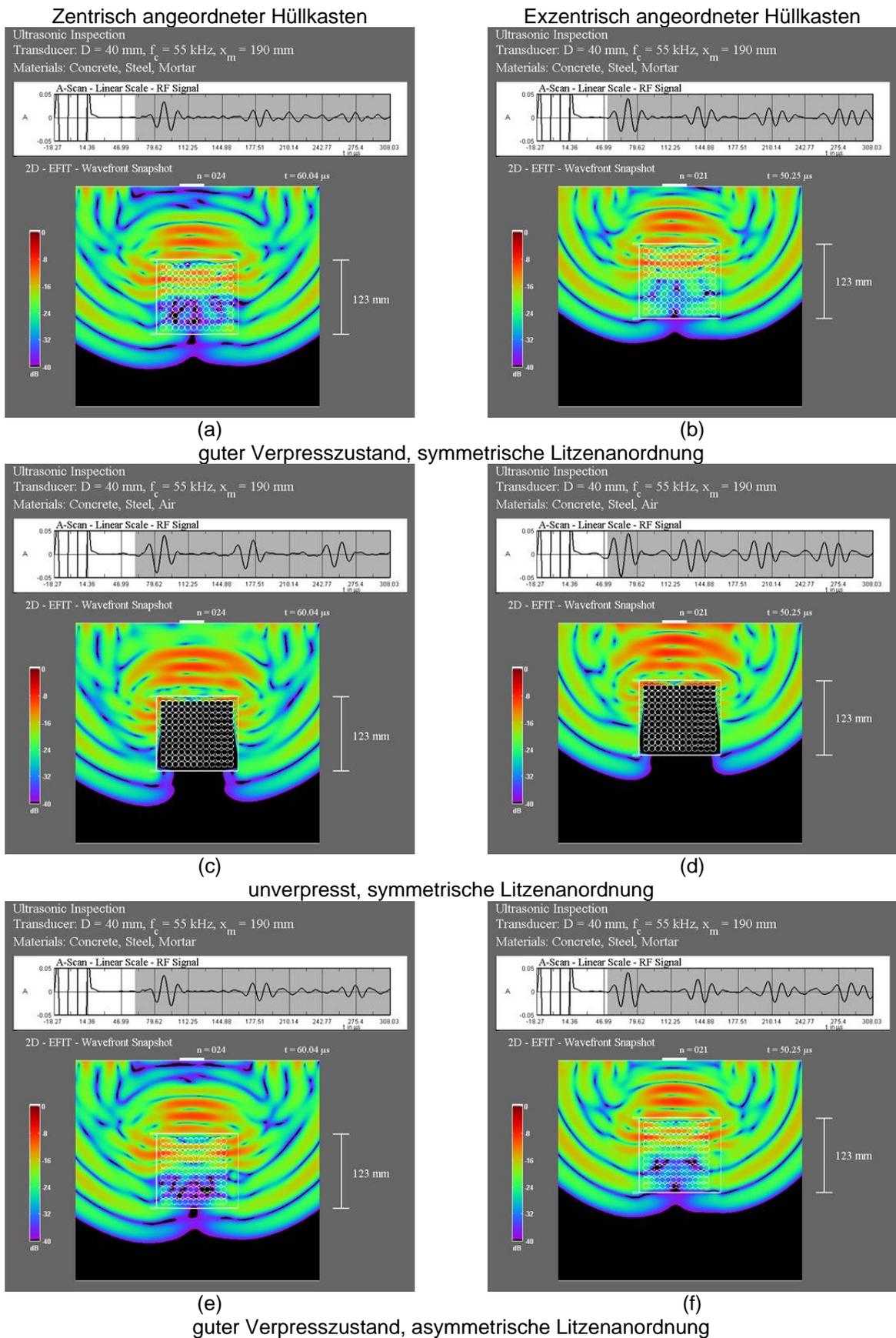


Bild 17 Wellenfronten und A-Bilder nach EFIT-Simulation

Vergleicht man die Ergebnisse der Simulation mit unverpresstem Hüllkasten mit denen der entsprechenden Modelle mit gut verpresstem Hüllkasten, fallen einige signifikante Unterschiede auf.

Der Ersteinsatz des ersten Echos (in dem Modell mit zentrisch angeordnetem Hüllkasten bei ca. 80 μs , in dem Modell mit geringerer Betondeckung bei ca. 60 μs) tritt bei guter Verpressung (Bild 17a, b und e, f) später auf als im Fall des unverpressten Hüllrohrs (Bild 17c, d). Außerdem ist die Phasenlage des Signals im unverpressten Fall gegenüber dem Fall mit gutem Verpresszustand gedreht. Ersteres entspricht den bekannten Beobachtungen in anderen Fällen, denen zufolge bei gutem Verpresszustand das signifikante Echo nicht vom Übergang Beton-Hüllrohr sondern vom Übergang Verpressmörtel-Litzenbündel hervorgerufen wird. Letzteres entspricht dem in 4.2 beschriebenen Prinzip, das der Phasenauswertung zum signifikanten Nachweis von Verpressfehlern zugrunde liegt.

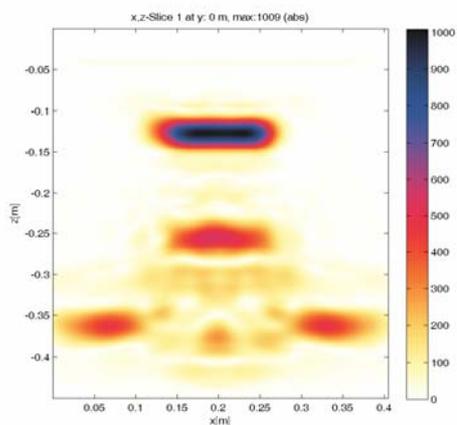
Betrachtet man den weiteren Signalverlauf im Falle des zentrisch angeordneten Hüllkastens, so fällt auf, dass in dem Fall des unverpressten Hüllkastens die weiteren Echos (bei ca. 170 μs und bei ca. 260 μs) klar erkennbar sind und die Phasenlage dieser Signale der Phasenlage des ersten Echos entspricht. Dies deutet darauf hin, dass es sich um Mehrfachreflexionen des ersten Reflektors, also der Hüllkastenwand handelt. In den Fällen mit gutem Verpresszustand sind diese Signale nicht mehr klar zu erkennen, außerdem ist die Phasenlage des zweiten Echos gegenüber der des ersten gedreht. Dies spricht dafür, dass sich hier jeweils die Mehrfachreflexionen des ersten Reflektors mit den Reflexionen der tiefer liegenden Reflektoren (hintere Hüllkastenwand, Bauteilrückwand) überlagern. Ein Blick auf die Signalverläufe, die aus den Modellen mit exzentrisch angeordnetem Hüllkasten hervorgingen, bestätigt diese Annahme.

6.3 Rekonstruktion der synthetischen Daten

Die Rekonstruktion der synthetisch gewonnenen Daten zeigt nochmals, wie schwierig eine Interpretation der Messergebnisse nur anhand der Bilder ist. Am wirklichkeitsnahen Modell (Bild 18 und Bild 19 a, c und e) des zentrisch angeordneten Hüllkastens ist das erste Echo von der Hüllkasten-vorderseite bzw. dem Litzenbündel sowohl in den Amplituden- (Bild 18) als auch den Phasenbildern (Bild 19) eindeutig in einer Tiefe von ca. 12 cm erkennbar. Wie ein Vergleich mit dem Modell des

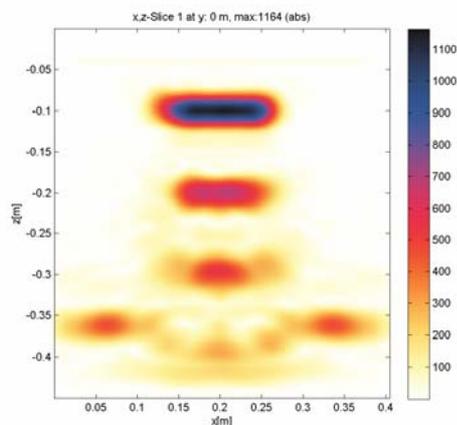
Hüllkastens mit geringerer Betondeckung zur Messoberfläche (Bild 18 Bild 19 b, d und f) zeigt, gehen die weiteren angezeigten Reflektoren im Bereich des Hüllkastens auf Mehrfachreflexionen am ersten Reflektor zurück. Im Falle des unverpressten Hüllkastens (Bild 18c) treten diese scheinbaren Reflektoren deutlicher hervor als im Falle des verpressten Hüllkastens (Bild 18a und e), wo es zu einer Überlagerung von Mehrfachecho und tatsächlicher Reflexion an tiefer liegenden Reflektoren kommt. Dies führt dazu, dass im Falle des gut verpressten Hüllkastens die Bauteilrückwand hinter dem Hüllkasten nicht mehr erkennbar ist, während an dieser Stelle im Falle des unverpressten Hüllkastens ein deutliches Signal zu sehen ist. Ohne Kenntnisse aus der Simulationsrechnung könnte man hier zu einem falschen Ergebnis gelangen, da man das nicht vorhandene Rückwandecho im Falle des gut verpressten Hüllkastens als Abschattung infolge einer Fehlstelle interpretieren könnte, während man beim gut erkennbaren Mehrfachecho am unverpressten Hüllkasten ein klares Rückwandsignal, also einen Hinweis auf einen guten Verpresszustand vermuten könnte.

Zentrisch angeordneter Hüllkasten

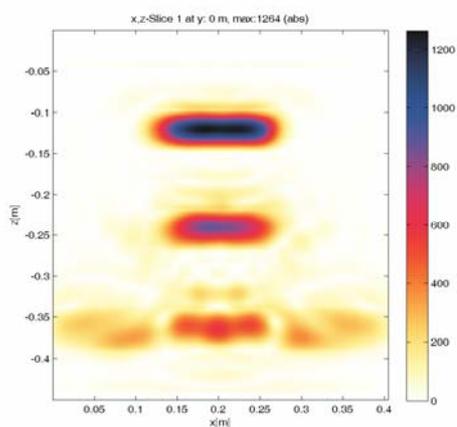


(a) guter Verpresszustand, symmetrische Litzenanordnung

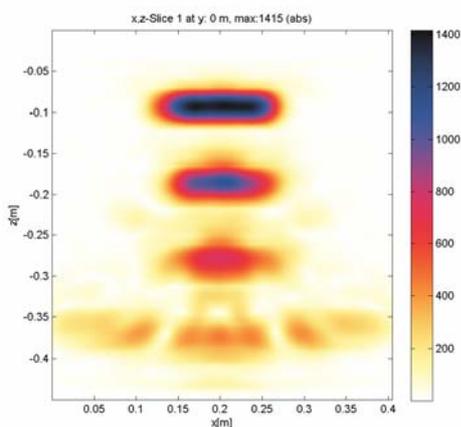
Exzentrisch angeordneter Hüllkasten



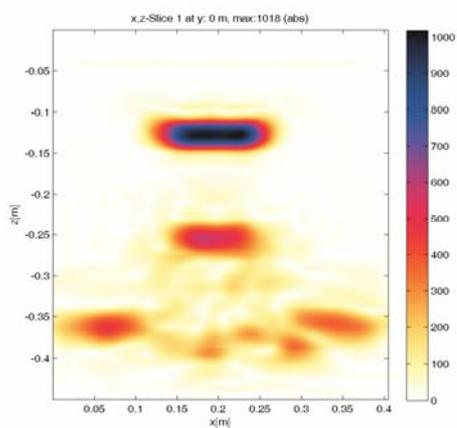
(b)



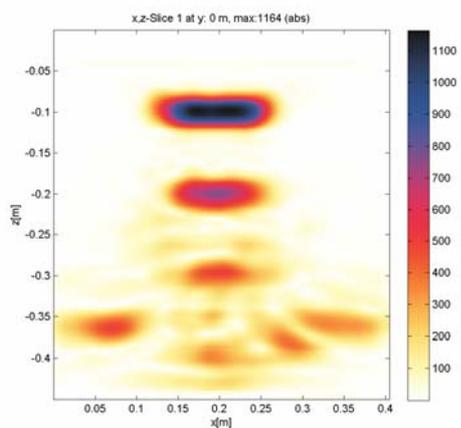
(c) unverpresst, symmetrische Litzenanordnung



(d)



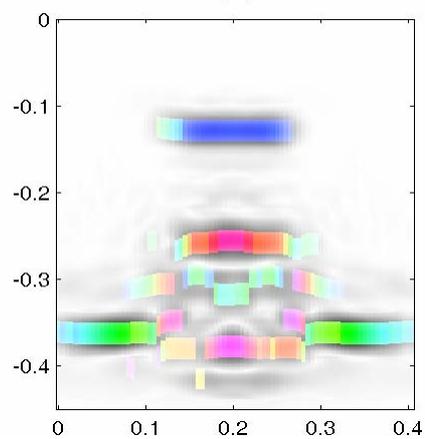
(e) guter Verpresszustand, asymmetrische Litzenanordnung



(f)

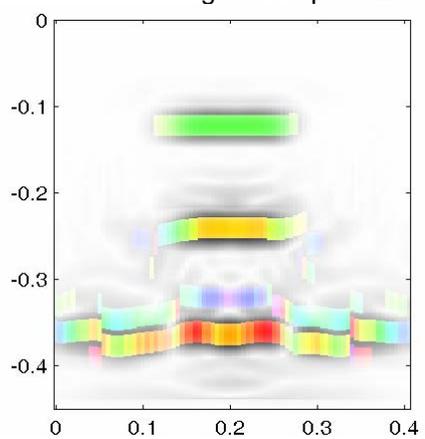
Bild 18 FT-SAFT-Rekonstruktion der durch EFIT-Simulation gewonnenen Daten, Amplitudenauswertung

Zentrisch angeordneter Hüllkasten



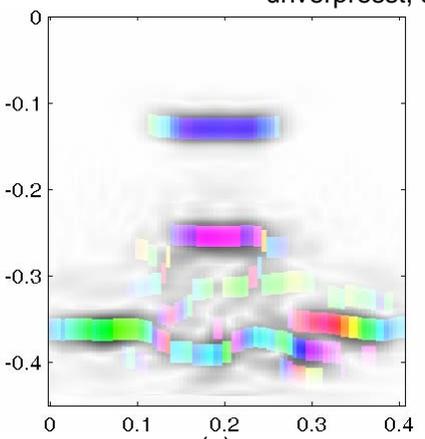
(a)

guter Verpresszustand, symmetrische Litzenanordnung



(c)

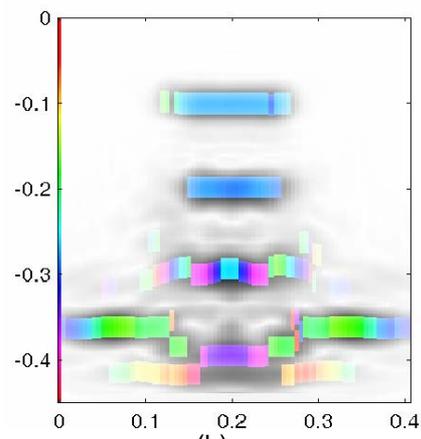
unverpresst, symmetrische Litzenanordnung



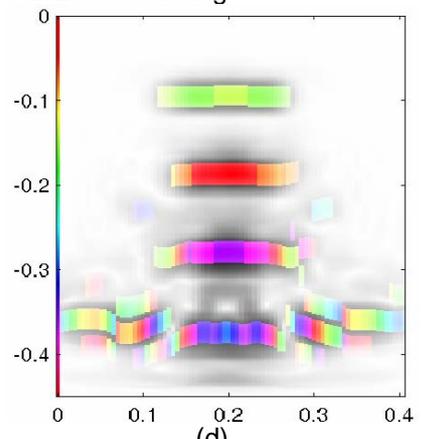
(e)

guter Verpresszustand, asymmetrische Litzenanordnung

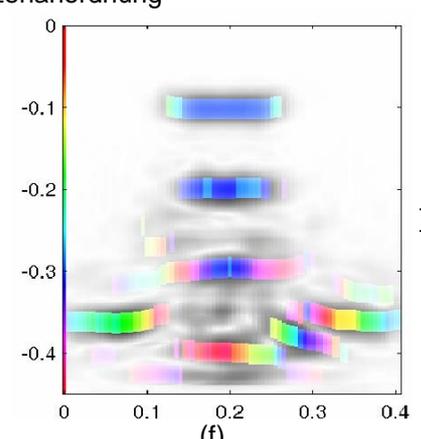
Exzentrisch angeordneter Hüllkasten



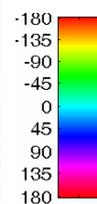
(b)



(d)



(f)

**Bild 19** FT-SAFT-Rekonstruktion der durch EFIT-Simulation gewonnenen Daten, Phasenauswertung

8 Auswertung und Ergebnisse

8.1 Steg

8.1.1 Ultraschall-Echo

Mit Hilfe des Ultraschallecho-Verfahrens konnte der Hüllkasten in allen untersuchten Bereichen von Träger 2 (Steg 6) geortet werden, wie aus Bild 24 ersichtlich ist. Dabei zeigte sich eine gute Übereinstimmung zwischen Bestandsplänen und Ultraschall-Ergebnissen.

Weder die Amplituden- noch die Phasenauswertung zeigten signifikante Hinweise auf Verpressfehler. Im Folgenden wird auf einige auffällige Stellen näher eingegangen.

Die Umlenkstellen, an denen die Hüllkastenwand stärker ist als in den geraden Bereichen – die Wanddicke beträgt hier 4 mm statt 1 mm – und wo sich außerdem zwischen Hüllkastenwand und Litzenbündel 1 mm starke Gleitbleche befinden, erscheinen als Bereiche schwacher Reflexionen. An der Umlenkstelle in Messfeld 1 tritt dieser Effekt sehr deutlich auf, wie aus Bild 23 hervorgeht.

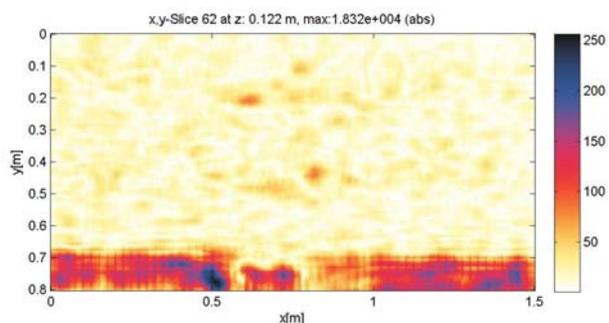


Bild 23 Messfeld 1: SAFT-C-Bild des Ultraschall-Datensatzes in einer Tiefe von 122 mm; Umlenkstelle zwischen 50 und 100 cm (lokale Koordinaten)

An der Umlenkstelle in Messfeld 6 ist dieser Effekt bei den Ergebnissen der Messung von der Vorderseite kaum zu beobachten, hier sind die Signale im Bereich rechts von der Umlenkstelle insgesamt deutlich schwächer als rechts davon (Bild 25). Bei den Ergebnissen der Messung von der Rückseite, die in Bild 26 dargestellt sind, tritt dieser Effekt wieder deutlich stärker auf.

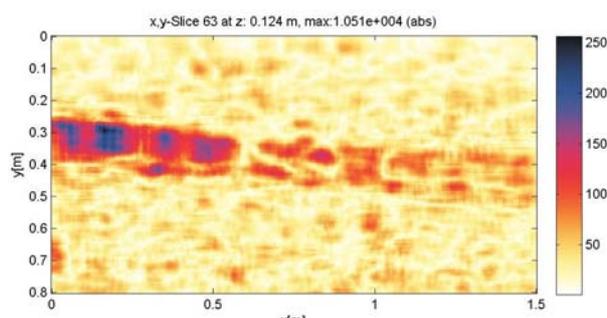


Bild 25 Messfeld 6, gemessen von der Vorderseite: SAFT-C-Bild des Ultraschall-Datensatzes in einer Tiefe von 124 mm; Umlenkstelle zwischen 50 und 100 cm (lokale Koordinaten)

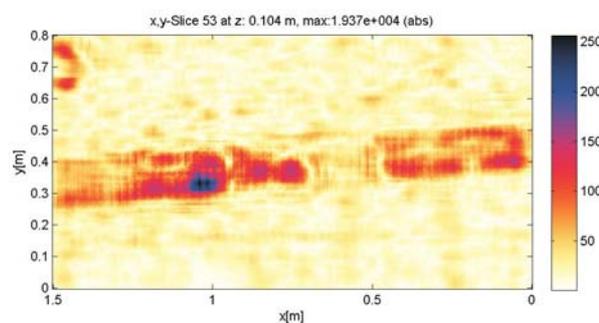


Bild 26 Messfeld 6, gemessen von der Rückseite: SAFT-C-Bild des Ultraschall-Datensatzes in einer Tiefe von 104 mm; Umlenkstelle zwischen 50 und 100 cm (lokale Koordinaten)

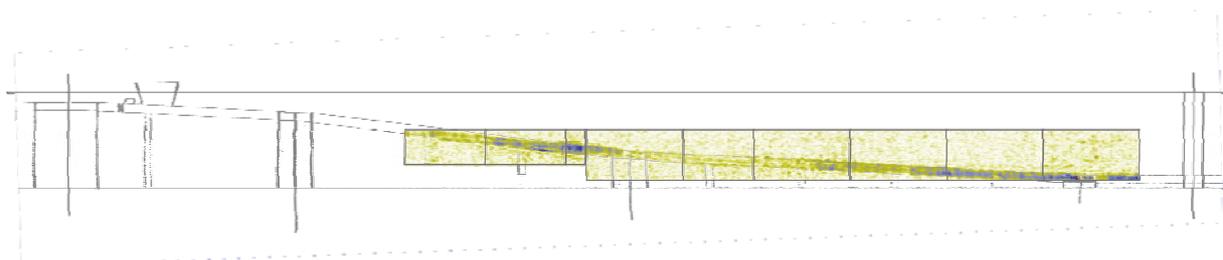


Bild 24 Träger 2 (Steg 6): Überlagerung von Bestandsunterlagen und SAFT-C-Bild (Fusion aller untersuchten Messfelder, Schnitt in einer Tiefe von 12 cm)

Dieser Effekt, der in den C-Bildern besonders deutlich wird, tritt auch in den entsprechenden B-Bildern zutage, wie Bild 27 zeigt. Im Bereich außerhalb der Umlenkstelle (Bild 27 links) ist eine sehr markante erste Reflexion, die von der Vorderseite des Hüllkastens hervorgerufen wird, erkennbar. Dahinter ist eine zweite Reflexion erkennbar, die nicht eindeutig zugeordnet werden kann. Es kann sich um ein Mehrfachecho der ersten Reflexion handeln, ebenso ist eine Reflexion von der Rückseite des Hüllkastens möglich. Im Bereich des Rückwandechos ist ein Abschattungseffekt erkennbar.

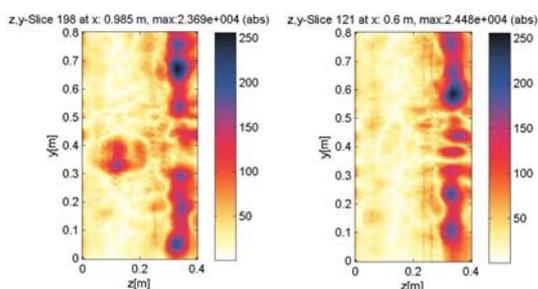


Bild 27 Messfeld 6, gemessen von der Rückseite: SAFT-B-Bilder des Ultraschall-Datensatzes. links: normaler Bereich, rechts: Umlenkstelle

Im Bereich der Umlenkstelle (Bild 27 rechts) hingegen tritt die erwartete Reflexion von der Hüllkasten-Vorderseite nicht deutlich aus dem Rauschen hervor. Tiefer liegende Reflexionen sind ebenfalls nicht erkennbar, lediglich ein Abschattungseffekt im Bereich der Rückwandreflexion weist auf den Hüllkasten hin.

Da die Messfelder 1 bis 5 lückenlos aneinander lagen und sie die gleiche Höhe aufwiesen, war es möglich, die dort gewonnenen Daten gemeinsam zu rekonstruieren. Dies geschah an der Universität Kassel. Bei der Auswertung der rekonstruierten Daten fiel auf, dass sich im Bereich der Messfelder 2 und 3 das zweite Echo deutlich von der Umgebung unterscheidet (siehe Bild 28). Aus der Tiefenlage dieser Reflexion und dem Rückwandecho ließen sich keine Hinweise auf Verpressfehler ableiten, die Phasenauswertung ergab ebenfalls keine Hinweise, da in den Bereichen außerhalb des markanten Signals die Amplituden deutlich unterhalb des für die Phasenauswertung noch sinnvollen Schwellenwerts lagen.

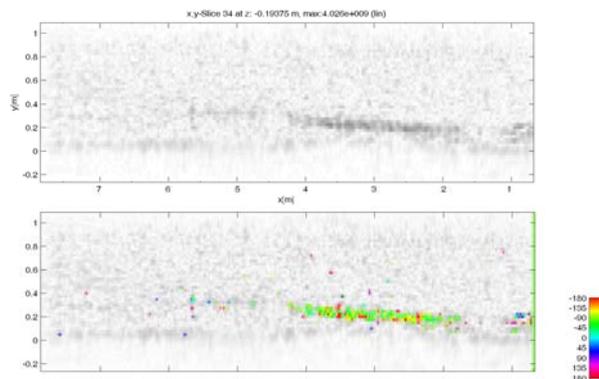


Bild 28 Messfeld 1 bis 5, gemeinsam rekonstruiert: SAFT-C-Bild des Ultraschall-Datensatzes in einer Tiefe von 194 mm. Oben: Amplitudenauswertung mit deutlich ausgeprägtem Zweitem Echo zwischen 2 und 3 m, unten: Phasenauswertung, die den Anfangsverdacht eines Verpressfehlers widerlegt.

8.1.2 Radar

Exemplarisch für die Radaruntersuchungen am Steg werden im Folgenden die Ergebnisse des Messfeldes 6 (Lage des Messfeldes siehe Bild 20) beschrieben.

Die im Messfeld horizontal und vertikal aufgenommenen Datensätze wurden einzeln 3D-SAFT-rekonstruiert und anschließend zu einem Datensatz fusioniert. In Bild 29 sind drei Tiefenschnitte (C-Bilder) dieses Fusionsdatensatzes, die parallel zur Oberfläche in unterschiedlichen Tiefen verlaufen dargestellt. Das C-Bild in 4 cm Tiefe zeigt zwei in Brückenlängsrichtung verlaufende Bewehrungsstäbe, das C-Bild in 6,5 cm Tiefe die darunter liegende Bügelbewehrung. Im Tiefenschnitt in 12 cm Tiefe ist der Verlauf des Hüllkastens ersichtlich.

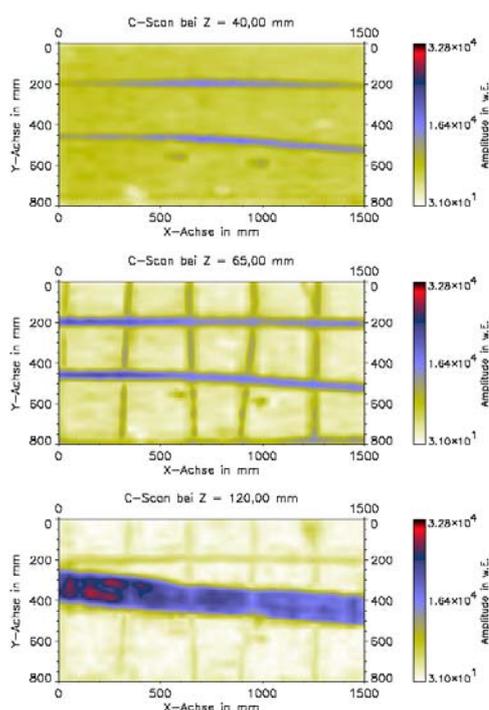


Bild 29 Messfeld 6: SAFT-C-Bilder eines Fusionsdatensatzes in einer Tiefe von 4 cm (Bild oben), 6,5 cm (Bild mitte) und 12 cm (Bild unten). Datensatz aufgenommen am mit einer 1,5 GHz-Antenne.

Das folgende Bild 30 zeigt ein SAFT-B-Bild (Schnittbild) des Steges im Messfeld 6 in Brückenlängsrichtung. Sichtbar sind hier die Reflexionszentren der vorderen und hinteren Bügelbewehrung.

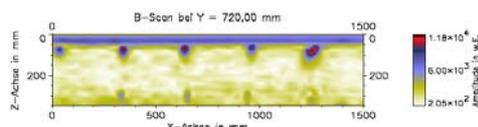


Bild 30 Messfeld 6: SAFT-B-Bild des Fusionsdatensatzes. Datensatz aufgenommen am Steg mit einer 1,5 GHz-Antenne.

Die jeweils einzeln aufgenommenen Datensätze der Messfelder 1-9 wurden nach der Rekonstruktion zu einem zusammenhängenden Datensatz mit den Abmessungen 11425 mm x 800 mm zusammengefügt. Bild 31 zeigt drei Tiefenschnitte (C-Bilder) dieses Datensatzes, die parallel zur Oberfläche in unterschiedlichen Tiefen verlaufen.

Im oberen Tiefenschnittbild in 8 cm Tiefe ist deutlich die Längs- und Bügelbewehrung zu erkennen. Auffällig ist hier die fehlende mittlere Längsbewehrung am linken Feldrand im Bereich von $x = 10145$ mm bis 12145 mm. Das Tiefenschnittbild in 13 cm Tiefe zeigt den Verlauf des Hüllkastens. Auch die hintere Bügel- und Längsbewehrung ist im unteren Tiefenschnittbild in 33 cm Tiefe gerade noch sichtbar.

8.1.3 Impakt-Echo

Der Steg wurde durchgehend in neun Feldern gemessen, wie bei den anderen Verfahren zuvor beschrieben. Die Messfelder 1-6 wurden mit einem Scanner mit einer Höhe von 80 cm abgefahren, die Felder 7-9 mit einem Scanner der Höhe von 55 cm. Laut Plan verläuft der Hüllkasten in der Ansicht von oben links nach unten rechts. Die Wanddicke beträgt nach Messungen am Bauwerk ca. 36 cm.

Im Bild 32 ist die Intensitätsverteilung für die Anzeige der Rückwandfrequenz dargestellt. Zum besseren Vergleich sind bei allen C-Bildern die Messungen normiert worden. Die hellen Bereiche, in denen die Intensität der Rückwandfrequenz schwächer ist, stimmen mit der Lage des Hüllkastens überein. Ein typisches Indiz für einen Hüllkasten bzw. für ein Hüllrohr ist eine Verschiebung der Rückwandreflexion im Bereich des Hüllkastens zu tieferen Frequenzen [10]. Diese Verschiebung mindert die Intensität im Bereich des Hüllkastens.

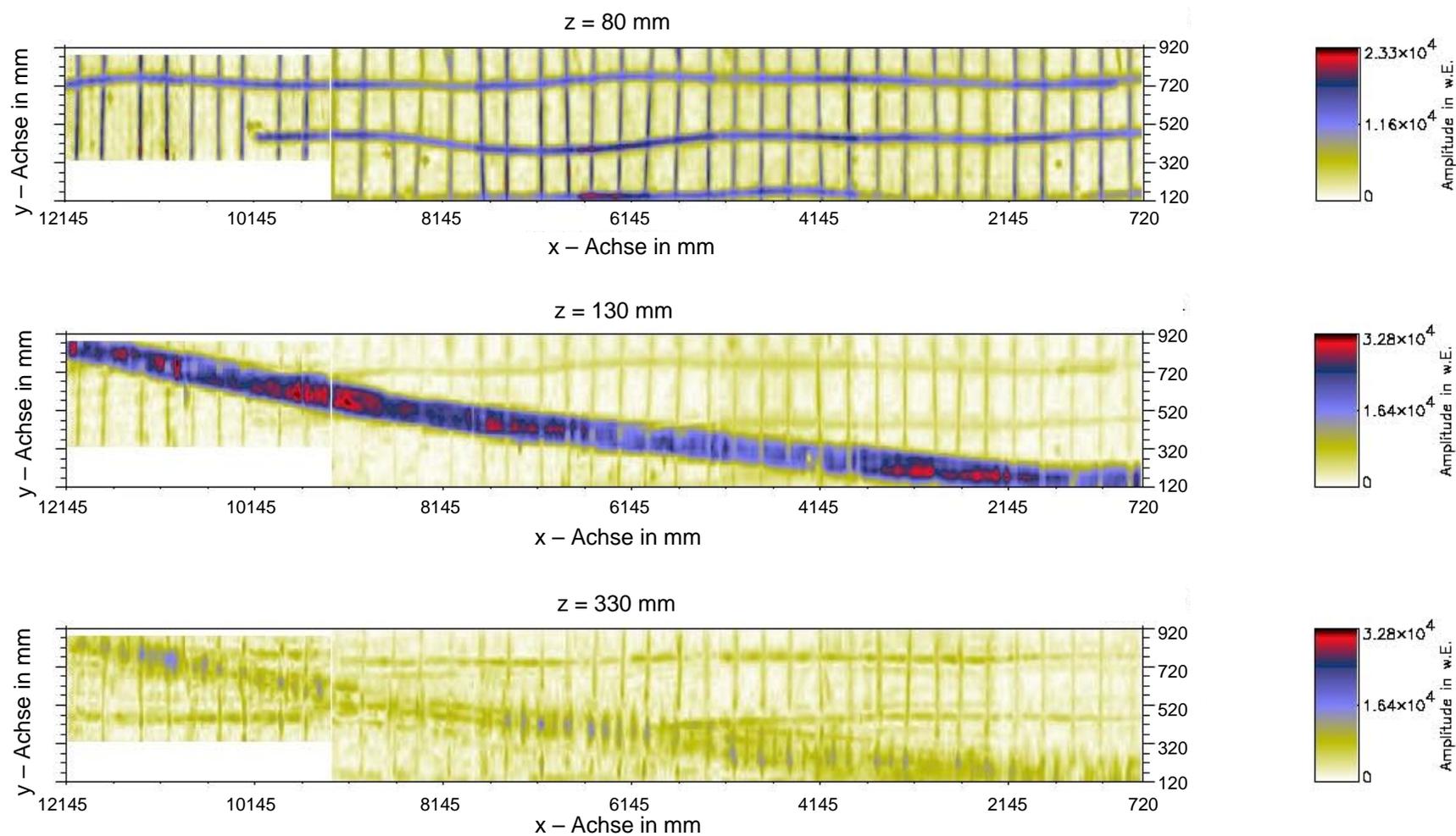


Bild 31 Messfelder 1–9: SAFT-C-Bilder eines Fusionsdatensatzes in einer Tiefe von 8 cm (Bild oben), 13 cm (Bild mitte) und 33 cm (Bild unten). Datensatz aufgenommen am Steg mit einer 1,5 GHz-Antenne (Lage der Messfelder siehe Bild 20). Die y -Achse ist um den Faktor 2 gedehnt.

Im Frequenzbereich, der etwas niedriger liegt als die Rückwandanzeige, was der durch den Hüllkasten verschobenen Rückwandanzeige entspricht, zeichnet sich der Hüllkasten als schwarzes Band mit hoher Intensität ab, wie im Bild 33 dargestellt.

Im Bild 32 ist die Hüllkastenanzeige an zwei Stellen (x zwischen 50 und 100 cm sowie 760 und 800 cm) unterbrochen; exakt an diesen Stellen befinden sich laut Plan die Umlenkpunkte.

In der linken Spalte der Tab. 2 (Hüllkasten außerhalb der Umlenkstellen) sind im oberen und unteren Bereich des B-Bildes die Rückwandanzeigen bei 5860 Hz zu erkennen sowie die verschobene Rückwandanzeige bei 4922 Hz. Die zuletzt genannte Anzeige wird jedoch an der Rückseite von einer zweiten Anzeige mit 4609 Hz überlagert. Die über der Rückwandverschiebung als Bogen zu erkennenden Anzeigen unterscheiden sich als einzige Anzeigen in beiden Impaktechogrammen, an der Vorderseite mit 8516 Hz und an der Rückseite mit 8125 Hz. Es muss sich mithin um einen Reflektor handeln, der zwar die gleiche Höhenlage, aber eine unterschiedliche Tiefe in Messrichtung hat. So ist der Hüllkasten ein möglicher Reflektor, bei dem sich die Betondeckung auf beiden Seiten unterscheidet. In der rechten Spalte (an der Umlenkstelle) liegt die Rückwandanzeige bei 5860 Hz und die verschobene Rückwandanzeige bei 5469 Hz. Die Differenz ist wesentlich geringer. Des Weiteren sind die direkten Reflexionen der Umlenkstellen ausschließlich in der vorderen Messung vorhanden ($f = 9766$ Hz) und wesentlich schwächer ausgeprägt.

Die direkte Reflexion ist jedoch keine sichere Anzeige für den Hüllkasten, da diese nicht im Bereich des gesamten Hüllkastens auftritt. An den Umlenkpunkten könnte dies mit dem unterschiedlichen Aufbau zusammenhängen, jedoch fehlen die Anzeigen auch in Bereichen des normalen Hüllkastenaufbaus.

Das Fehlen und Erscheinen dieser Anzeigen sollte näher untersucht werden, hierzu wurden in Bereichen mit und ohne die direkten Reflexionen Bohrkerne gezogen und untersucht inwieweit ein unterschiedlicher Aufbau oder Verarbeitungsqualität dafür verantwortlich ist.

Das Fehlen der direkten Reflexionen ist in Bild 34 sowohl im Bereich von x zwischen 900 und 1100 cm als auch am Übergang zwischen 300 und 350 cm (BK14) zu erkennen. An diesen Stellen sowie im Feld 2 (BK13) und 4 (BK7) mit direkten Reflexionen wurde zur näheren Untersuchung jeweils ein Bohrkern gezogen (vgl. Anlage 1). Die Unter-

suchung der Bohrkerne zeigte, dass sich an beiden Positionen weder im Aufbau des Hüllkastens noch in der Art des Verpressmörtels im Inneren oder durch den, den Hüllkasten umgebenden Beton ein Unterschied ergibt. In Tab. 1 sind die B-Bilder und die Fouriertransformierte einer Punktmessung über dem Hüllkasten an den Positionen des Bohrkerns 13 und 14 zum Vergleich dargestellt. In der linken Spalte ist im Bereich des Hüllkastens eine Doppelung der Anzeige zu sehen, in der rechten Zeile ist dies nicht zu beobachten.

Zusammenfassend ist festzuhalten: Normalerweise können Hüllrohre mit Impakt-Echo nicht durch eine direkte Reflexion der Hüllrohroberkante nachgewiesen werden, sondern nur durch die Verschiebung der Rückwandanzeige. Aus diesem Grund erfolgt die Darstellung wie in Bild 32, wo die hohe Intensität der Rückwandreflexion (schwarz) in den Bereichen des Hüllrohrs durch die Verschiebung der Rückwandreflexion zu tieferen Frequenzen durch die geringeren Intensitäten (weiß) gekennzeichnet ist. Alternativ kann auch, wie in Bild 33 zu sehen, der niedrigere Frequenzbereich dargestellt werden, in dem sich der Hüllkasten durch hohe Intensitäten (schwarz) der verschobenen Rückwand abzeichnet. Die Umlenkpunkte mit ihrem vom normalen Hüllkasten abweichenden Aufbau können hier durch eine geringere Verschiebung der Rückwandanzeige identifiziert werden.

Im Fall der hier vorhandenen Hüllkästen ist aufgrund der Form und der größeren Abmessungen bereichsweise eine direkte Ortung des Hüllkastens möglich (Bild 34). Ein Zusammenhang von Unterschieden im Aufbau und dem Auftreten bzw. Fehlen der direkten Reflexion konnte nicht festgestellt werden.

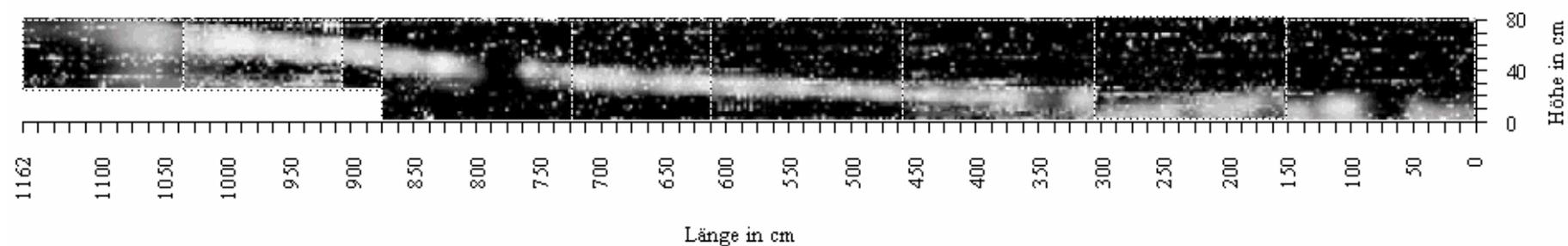


Bild 32 Messfelder 1-9: Intensität des Rückwandechos im Bereich von 5,70-5,82 kHz. Die Umlenkpunkte sind zwischen 50 und 100 cm und 760 und 800 cm als Unterbrechung der Hüllkastenabschattung zu erkennen. Schwarz entspricht einer hohen Intensität.

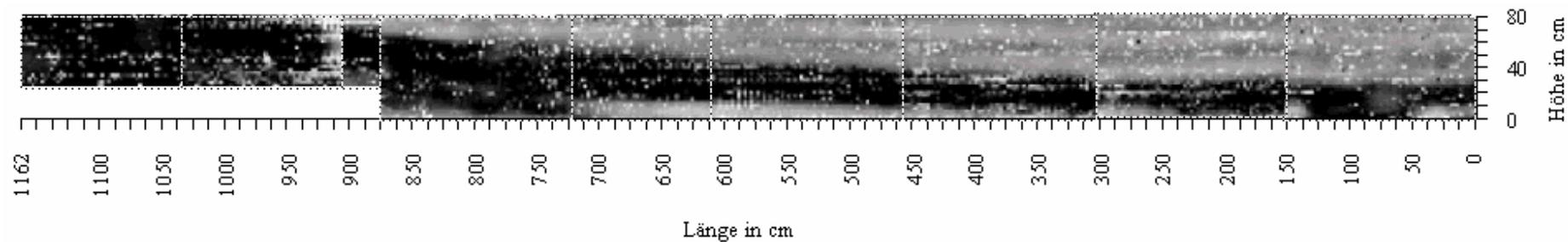


Bild 33 Messfelder 1-9: Intensität der Amplituden bei einer Frequenz von 4,62-5,06 kHz, was der durch den Hüllkasten zu niedrigeren Frequenzen verschobenen Rückwandanzeige entspricht. Schwarz entspricht einer hohen Intensität.

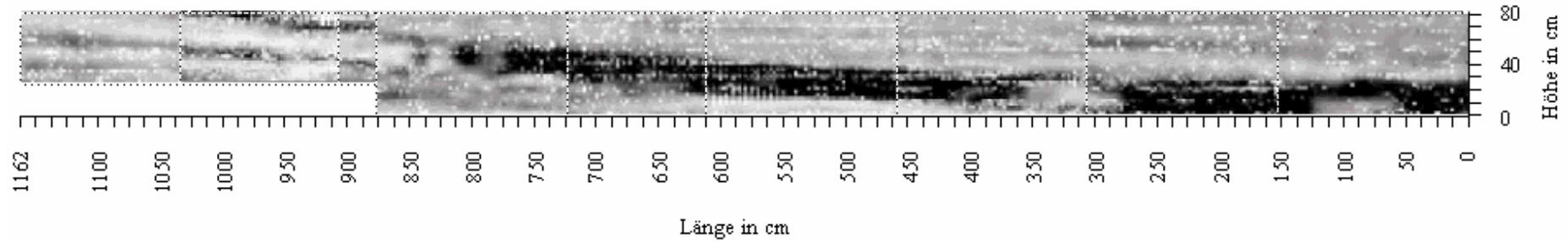


Bild 34 Messfelder 1-9: Intensität der direkten Reflexion des Hüllrohres im Bereich zwischen 6,77-8,29 kHz. Schwarz entspricht einer hohen Intensität. Die direkte Reflexion ist trotz gleichem Aufbau des Hüllkastens bereichsweise nicht erkennbar.

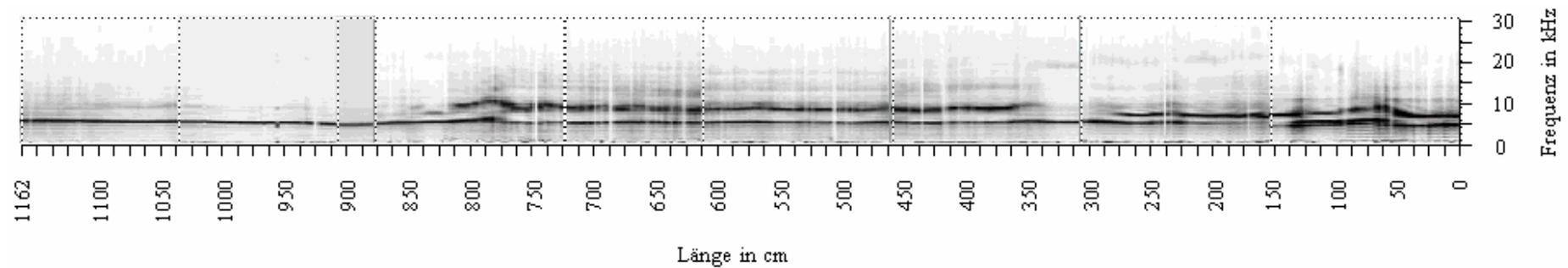


Bild 35 Messfelder 1-9: Als quasi Schnitt entlang des Hüllkastens zeigt das Impaktechogramm über den gesamten Bereich die verschobene Rückwandanzeige (untere Linie), nicht aber die direkten Reflexionen des Hüllkastens, welche an mehreren Stellen unterbrochen sind (obere Linie). Schwarz entspricht einer hohen Intensität.

Tab. 1 Obere Zeile: Linienmessungen im Feld 2 und 3 senkrecht über den Hüllkasten am Ort der späteren Bohrkernentnahme. Schwarz entspricht einer hohen Intensität. Untere Zeile: Fouriertransformierte; rot Mittelwert, grün Einzelpunkt.

	Bohrkern 13	Bohrkern 14
B-Bild		
FFT		
	Messlinie 92 Punkt 30	Messlinie 119 Punkt 28

Tab. 2 : Linienmessungen im Feld 6 senkrecht über den Hüllkasten hinweg. Schwarz entspricht einer hohen Intensität.

Messung im Feld 6	am Hüllkasten (außerhalb der Umlenkstelle)	an der Umlenkstelle
Vorderseite		
Rückseite		

8.2 Fahrbahnplatte

8.2.1 Ultraschall-Echo

An der Unterseite der Fahrbahnplatte wurden drei Messfelder mit dem Ultraschallecho-Verfahren untersucht (siehe Anlage 2). Exemplarisch wird an dieser Stelle auf die Ergebnisse von Messfeld 1 eingegangen. Das Messfeld hat eine Breite von 100 cm und eine Länge von 150 cm und wurde in einem Raster von 2,5 cm x 2,5 cm abgetastet.

Bild 36 zeigt ein B-Bild (Schnitt in Brückenlängsrichtung durch die Fahrbahnplatte) des SAFT-rekonstruierten 3D-Datensatzes. Deutlich erkennbar sind die Querspannglieder in ca. 6 cm Tiefe, die untereinander einen Abstand von 20 cm haben sowie die Rückwand in einer Tiefe von 20 cm, die deutlich schwächer auch in einer größeren Tiefe als Mehrfachreflexion dargestellt wird. Außerdem erkennbar ist eine horizontale Reflexion in ca. 30 cm Tiefe. Hier könnte es sich um eine Reflexion von der Oberseite des Fahrbahnbelags handeln, deren wirkliche Tiefenlage abweicht, weil der Rekonstruktionsalgorithmus von einer konstanten Schallgeschwindigkeit im Rekonstruktionsraum ausgeht und die Schallgeschwindigkeit im Asphalt geringer ist als im Beton.

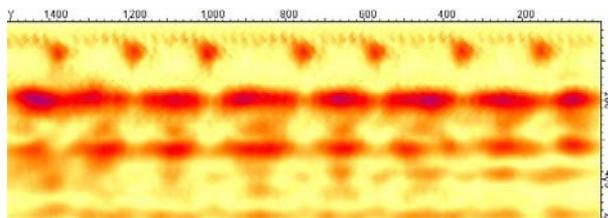


Bild 36 SAFT-B-Bild von Messfeld 1 an der Unterseite der Fahrbahnplatte. Projektion über die gesamte Breite des Messfelds (Einheiten in mm).

Um den horizontalen Verlauf der Querspannglieder im Messfeld sichtbar zu machen, wurde ein Schnitt parallel zur Messoberfläche erzeugt, der in Bild 37 zu sehen ist.

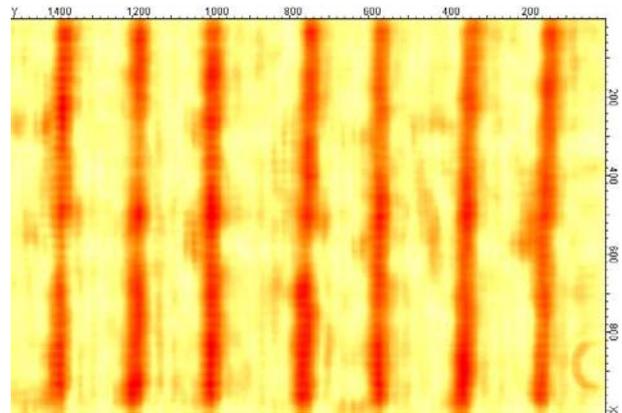


Bild 37 SAFT-C-Bild von Messfeld 1 an der Unterseite der Fahrbahnplatte. Darstellung der Spanngliedlage in einer Tiefe von 7 cm (Einheiten in mm).

8.2.2 Radar

An der Unterseite der Fahrbahnplatte wurden mit Radar zwei Messfelder mit jeweils einer Breite von 100 cm und einer Länge von 150 cm untersucht. Die Felder lagen direkt aneinander, so dass sich eine zusammenhängende Gesamtfläche der Messfelder 1 und 2 von 100 cm x 300 cm ergibt (Lage der Messfelder siehe Bild 21). Die horizontal und vertikal aufgenommenen Datensätze jedes Messfeldes wurden einzeln 3D-SAFT-rekonstruiert und anschließend zu einem Datensatz fusioniert. In Bild 38 sind zwei C-Bilder dieses Fusionsdatensatzes in unterschiedlichen Tiefen dargestellt. Das C-Bild in 4 cm Tiefe zeigt die oberflächennahe schlaife Bewehrung. Auffällig ist die nicht parallel zur Oberfläche verlaufende Querbewehrung. An den Feldrändern ist sie bereits in 4 cm Tiefe sichtbar, zur Mitte hin weist sie dagegen eine größere Betondeckung auf.

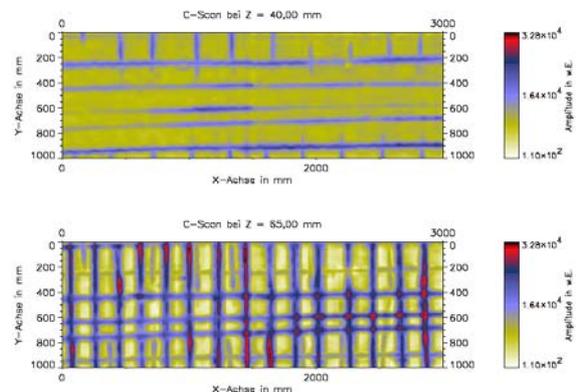


Bild 38 SAFT-C-Bild des Fusionsdatensatzes in einer Tiefe von 4 cm (Bild oben) und 6,5 cm (Bild unten), Lage der Messfelder siehe Bild 21. Datensatz aufgenommen an der Fahrbahnplatte mit einer 1,5 GHz-Antenne.

Das C-Bild in einer Schnitttiefe von 6,5 cm zeigt deutlich den Verlauf von 15 Querspanngliedern, die einen Achsabstand von 20 cm aufweisen.

In Bild 39 ist ein Schnittbild (SAFT-B-Bild) der Fahrbahnplatte in Brückenlängsrichtung dargestellt. Sichtbar sind hier die Reflexionszentren der schlaffen Querbewehrung und Querspannglieder in 4 bis 6 cm Tiefe sowie ein über die gesamte Messfläche verlaufende Reflexion in ca. 27 cm Tiefe, die (vermutlich von der Fahrbahnfläche der Platte verursacht wird).

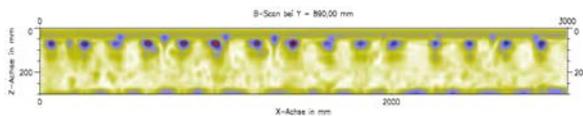


Bild 39 SAFT-B-Bild des Fusionsdatensatzes. Datensatz aufgenommen an der Fahrbahnplatte mit einer 1,5 GHz-Antenne (Lage der Messfelder siehe Bild 21).

8.2.3 Impakt-Echo

An der Unterseite der Fahrbahnplatte wurden die Messfelder 1 und 2 untersucht, die aneinander anschließen. Sie hatten jeweils eine Breite von 100 cm und eine Länge von 150 cm (Lage der Messfelder siehe Bild 21). Der Aufbau der Fahrbahnplatten bestand aus einer Schicht von 20 cm Beton und einem bituminösen Fahrbelag von 8 cm. Während der Messungen war der Brückenabschnitt, an dem gemessen wurde, unter Verkehr. Die durch die LKW hervorgerufenen Erschütterungen verursachen Auslenkungen vornehmlich senkrecht zur Fahrbohnoberfläche und damit genau in Messrichtung des Sensors. Diese Vibrationen sind in ihrer Amplitude wesentlich größer als die der Amplituden des Messsignals, das durch die Überlagerung unbrauchbar wird. Dies war bei einem Teil der Messergebnisse der Fall. Bei den Messungen an den senkrechten Flächen überlagern sich die, durch den Verkehr hervorgerufenen Vibrationen nicht mit dem Messsignal, da die Auslenkungen orthogonal zueinander sind und die Amplituden sich nicht addieren.

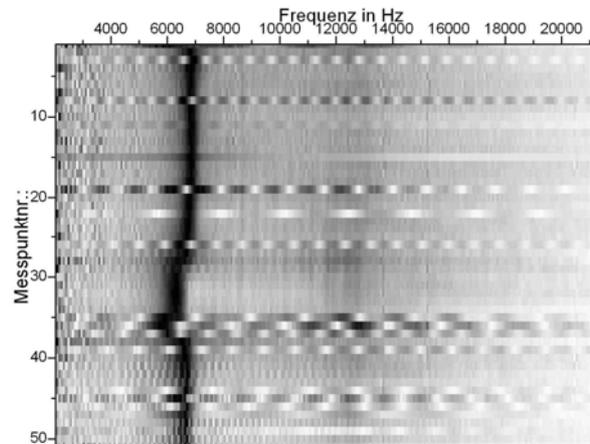


Bild 40 Impaktechogramm an der Fahrbahnplatte im Bereich von Messfeld 1. Darstellung der Frequenzamplituden der ersten Messlinie. Schwarz entspricht einer hohen Intensität.

In Bild 40 sind die gestörten Messungen als abwechselnd hell dunkle Bänder zu erkennen; bei den ungestörten Messungen ist die Rückwandanzeige bei 6-7 kHz sowie eine zweite schwächer ausgeprägte Anzeige bei rd. 13 kHz gut zu erkennen. Da die beiden Anzeigen parallel zueinander verlaufen und betragsmäßig der doppelten Frequenz entsprechen, kann davon ausgegangen werden, dass es sich um die nächst höhere harmonische Schwingung handelt.

Laut US- und Radar-Messungen verlaufen in geringem Abstand Hüllrohre quer zu dem im Bild 40 dargestellten Impaktechogramm. Diese sind jedoch aufgrund des geringen Hüllrohrdurchmessers (im Vergleich zum Hüllkasten am Steg) mit Impakt-Echo-Messungen nicht zu orten. (Siehe auch 8.3.3)

Die Anzeige von 7 kHz im Bereich des später gezogenen Bohrkerns BK1 (siehe Kapitel 10.2) würde bei einer angenommenen Bauteildicke von 20 cm einer Schallgeschwindigkeit von $c = 7000 \cdot 0,2 \cdot 2 = 2800$ m/s entsprechen. Diese Geschwindigkeit ist für den verbauten Beton zu gering. Demnach muss die Anzeige der gemeinsamen Dicke von Beton und der bituminösen Fahrbahn zugeordnet werden.

Zu einem späteren Zeitpunkt war der Fahrbelag entfernt worden, und es konnten Handmessungen im Bereich der beiden Messfelder durchgeführt werden.

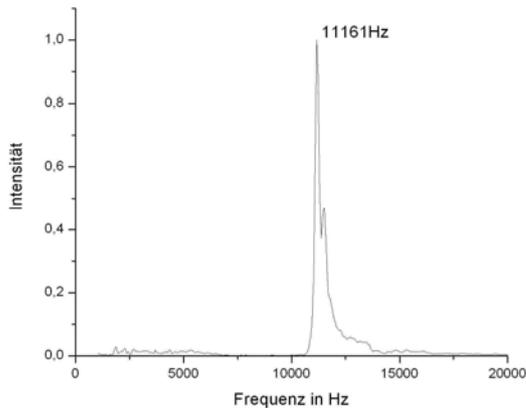


Bild 41 Fouriertransformierte Handmessung im Bereich des ersten Feldes in der Nähe des Bohrlochs.

Die im Bereich des Bohrkerns BK1 mit 20 cm Länge ermittelten Frequenzanzeigen ergaben eine Frequenz von 11.161 Hz Bild 41, was einer Schallgeschwindigkeit von $c = 11\,161 \cdot 0,2 \cdot 2 = 4464$ m/s entspricht.

Bei bekannter Schallgeschwindigkeit für beide Schichten zusammen und der der Betonschicht kann die Schallgeschwindigkeit für Bitumen mit $c_{\text{Bit}} = 3.005$ m/s angegeben werden.

8.3 Querträger

8.3.1 Ultraschall-Echo

Mit dem Ultraschallecho-Verfahren in automatisierter Anwendung wurde am Querträger ein Messfeld einer Breite von 125 cm und einer Höhe von 55 cm in einem Raster von 2,5 cm untersucht (Bild 22). Bild 42 zeigt eine Projektion des mit einem SAFT-Algorithmus rekonstruierten 3D-Datensatzes über die gesamte Breite des Messfeldes. Deutlich erkennbar sind zwei Hüllrohre in einer Tiefe von 13 cm sowie die Rückwand des Bauteils in 60 cm Tiefe. Deutlich schwächer erkennbar ist die in einer Tiefe von ca. 6 cm liegende horizontale Bewehrung des Querträgers, die sich knapp oberhalb der Hüllrohre befindet. In dieser Darstellung ist kaum vom Rauschen unterscheidbar die vertikale Bewehrung des Querträgers in einer Tiefe von ca. 4-5 cm. Diese wird normalerweise durch Radarmessungen dargestellt.

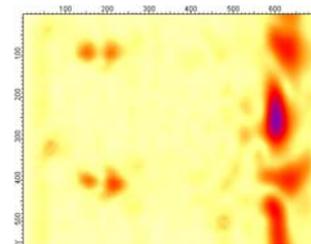


Bild 42 SAFT-B-Bild, Projektion über die gesamte Breite des Querträger-Messfeldes (Einheiten in mm)

In der folgenden Abbildung, einem Tiefenschnitt, wird der Verlauf der Spannglieder über die Breite des Querträger-Messfeldes sichtbar.

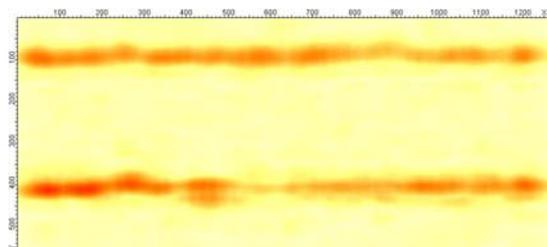


Bild 43 SAFT-C-Bild, Projektion über die Spanngliedlage in einer Tiefe von 13-18 cm des Querträger-Messfeldes (Einheiten in mm)

Die in den vorliegenden Bestandsunterlagen nicht verzeichneten Querspannglieder wurden zusätzlich manuell mit dem Linienarray untersucht, mit dem die SAFT-Rekonstruktion direkt auf der Baustelle ausgeführt wird und die rekonstruierten Daten wenige Minuten später zur Verfügung stehen. Das Array wurde hierbei senkrecht zu den Spanngliedern ausgerichtet und entlang der Spanngliedachse parallel um 2 cm verschoben. Dabei wurden dieselben Bereiche abgedeckt, die auch Gegenstand der Scannermessung waren.

In Bild 44 sind die Ergebnisse der Messung mit dem Linienarray am oberen Spannglied, die mit einem an der Universität Kassel entwickelten SAFT-Algorithmus ausgewertet wurden, dargestellt. Deutlich ist das erste Spannglied erkennbar, ebenfalls eine kurz dahinter liegende zweite Reflexion, die von der Rückseite des Hüllrohres verursacht sein kann. Aufgrund des gegenüber dem am Scanner verwendeten Prüfkopfarrays größeren Öffnungswinkels der im Linienarray eingesetzten Prüfkopfmodule wird ebenfalls das rückwärtige Spannglied abgebildet, das bei der Scannermessung aufgrund von Abschattungseffekten unsichtbar bleibt. Die Rückwand des Querträgers in einer Tiefe von 60 cm wird ebenfalls gut abgebildet.

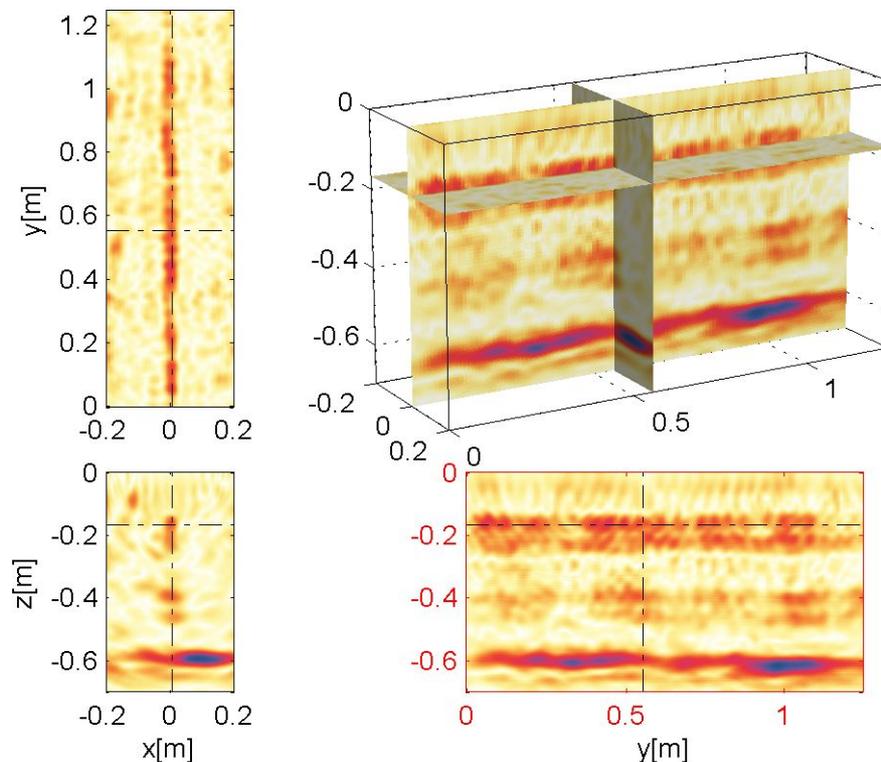


Bild 44 Querträger: Messung mit Linienarray am entlang des oberen Spannglieds: links oben C-Bild, vordere Spanngliedlage, links unten B-Bild quer zum Spannglied, rechts unten B-Bild längs zum Spannglied, rechts oben dreidimensionale Darstellung. Die Hüllrohre in einer Tiefe von ca. 13 und ca. 40 cm (Eintrittsecho) sind gut erkennbar

8.3.2 Radar

Am Querträger wurde mit dem Radarverfahren das gleiche Messfeld wie zuvor mit Ultraschall mit einer Breite von 125 cm und einer Höhe von 55 cm untersucht (Lage des Messfeldes siehe Bild 22). Die folgenden beiden Abbildungen zeigen exemplarisch zwei Tiefenschnitte (C-Bilder) aus dem fusionierten und 3D-FT-SAFT-rekonstruierten Datensatz. Einen Überblick über die Lage der oberen Bewehrung gibt das in Bild 45 dargestellte C-Bild des Fusionsdatensatzes in einer Tiefe von 5 cm.

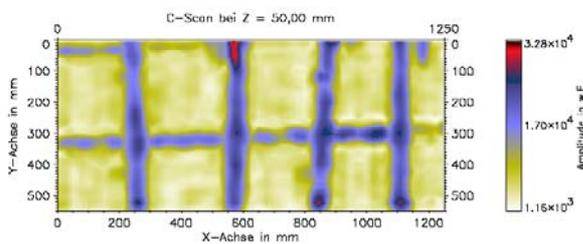


Bild 45 SAFT-C-Bild des Fusionsdatensatzes in einer Tiefe von 5 cm des Messfeldes am Querträger (Lage des Messfeldes siehe Bild 22).

In Bild 46 ist das SAFT-C-Bild in einer Tiefe von 12 cm dargestellt. Deutlich sichtbar ist hier der Hüllrohrverlauf im Messfeld. Die Rückwand konnte bei einer Bauteildicke von ca. 60 cm mit der verwendeten 1,5 GHz-Antenne (Eindringtiefe in Beton unter günstigen Bedingungen von 50 cm) nicht detektiert werden.

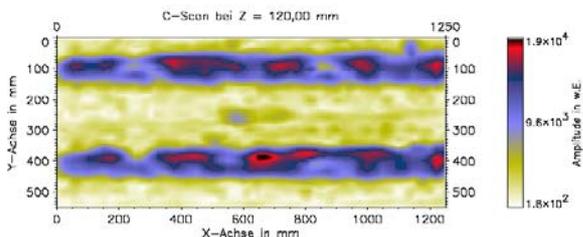


Bild 46 SAFT-C-Bild des Fusionsdatensatzes in einer Tiefe von 12 cm (Lage des Messfeldes siehe Bild 22).

8.3.3 Impakt-Echo

Am Querträger wurde das gleiche Feld wie zuvor beschrieben mit einer Länge von 125 cm und einer Höhe von 55 cm im 2,5 cm-Raster gescannt. Die Dicke des Bauteils konnte aufgrund der Zugänglichkeit nur am unteren Rand mit 60 cm ge-

messen werden. Bei allen Darstellungen wurde eine integrale Normierung vorgenommen, um Intensitätsschwankungen durch unterschiedliche Oberflächenbeschaffenheiten und damit variierende Ankoppelbedingungen zu vermeiden.

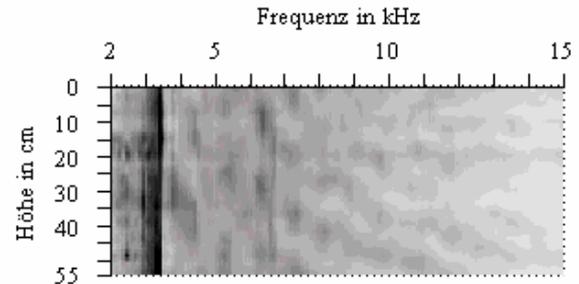


Bild 47 Vertikales Impaktechogramm am Querträger. Schwarz entspricht einer hohen Intensität Messfeld Qt1

Im Bild 47 ist die Rückwand eindeutig zu erkennen; das Rückwandecho liegt bei 3,52 kHz. Die hyperbelförmigen Muster im B-Bild sind Geometrieeffekte. Diese entstehen durch Reflexion der Oberflächenwellen an den Bauteilkanten und enthalten keine Tiefeninformationen.

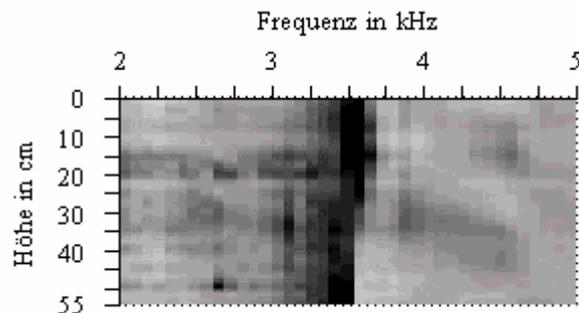


Bild 48 Ausschnittsvergrößerung von Bild 47. Schwarz entspricht einer hohen Intensität.

In Bild 48 einer Ausschnittsvergrößerung von Bild 47, im Frequenzbereich von 2-5 kHz, ist eine Verschiebung der Rückwandfrequenz von 3,59 kHz auf 3,44 kHz zu erkennen. Die an der Unterkante gemessene Dicke von 60 cm entspricht bei der Rückwandfrequenz von 3,44 kHz einer Schallgeschwindigkeit von 4128 m/s, was den an anderen Bauteilen ermittelten Werten entspricht. Diese Rückwandfrequenzänderung wird vor allem im C-Bild bei 3,59 kHz deutlich und lässt auf eine

Änderung der Wanddicke oder der Schallgeschwindigkeit schließen.

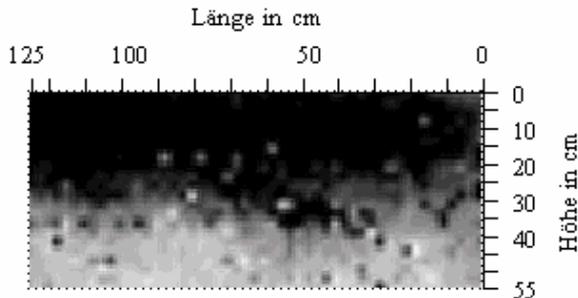


Bild 49 C-Bild des Querträgers; Intensität der Amplituden bei 3,59kHz. Schwarz entspricht einer hohen Intensität. Messfeld Qt1

Des Weiteren sind keine Rückwandverschiebungen im B-Bild (Impaktechogramm) sowie im C-Bild, die indirekt auf Hüllrohre schließen lassen, zu erkennen. Den US- und Radaruntersuchungen zur Folge sind zwei Hüllrohre in einer Tiefe von ca. 15 cm vorhanden. Die Hüllrohre sind ellipsoid mit einem maximalen Durchmesser von 4 cm und einem minimalen Durchmesser von 2 cm.

Aufgrund der verwendeten Wellenlängen beim IE-Verfahren und der Dicke der Wand, ist die Ortung von Elementen dieser Größe normalerweise nicht möglich.

8.4 Einfüllrohr am Steg

8.4.1 Radar

In dem, am Steg aufgenommenen Messfeld 9 (Lage des Messfeldes siehe Bild 20), zeigt sich in dem 3D-Saft-rekonstruierten und fusionierten Radardatensatz ein oberflächennaher deutlicher Reflektor. Abbildung Bild 50 zeigt einen Tiefenschnitt (C-Bild) in 5 cm Tiefe dieses Datensatzes, in dem dieser Reflektor deutlich sichtbar ist. Eine darauf hin durchgeführte Bohrkernentnahme zeigte, dass es sich hierbei um ein metallisches Einfüllrohr handelt. Das Rohr konnte auf den cm genau geortet werden, wobei die Hauptschwierigkeit in der genauen Übertragung der präzise ermittelten Lage bestand (vgl. Abs. 10.4).

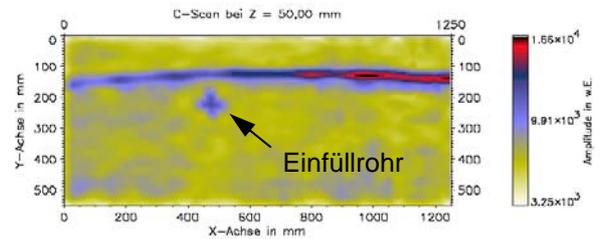


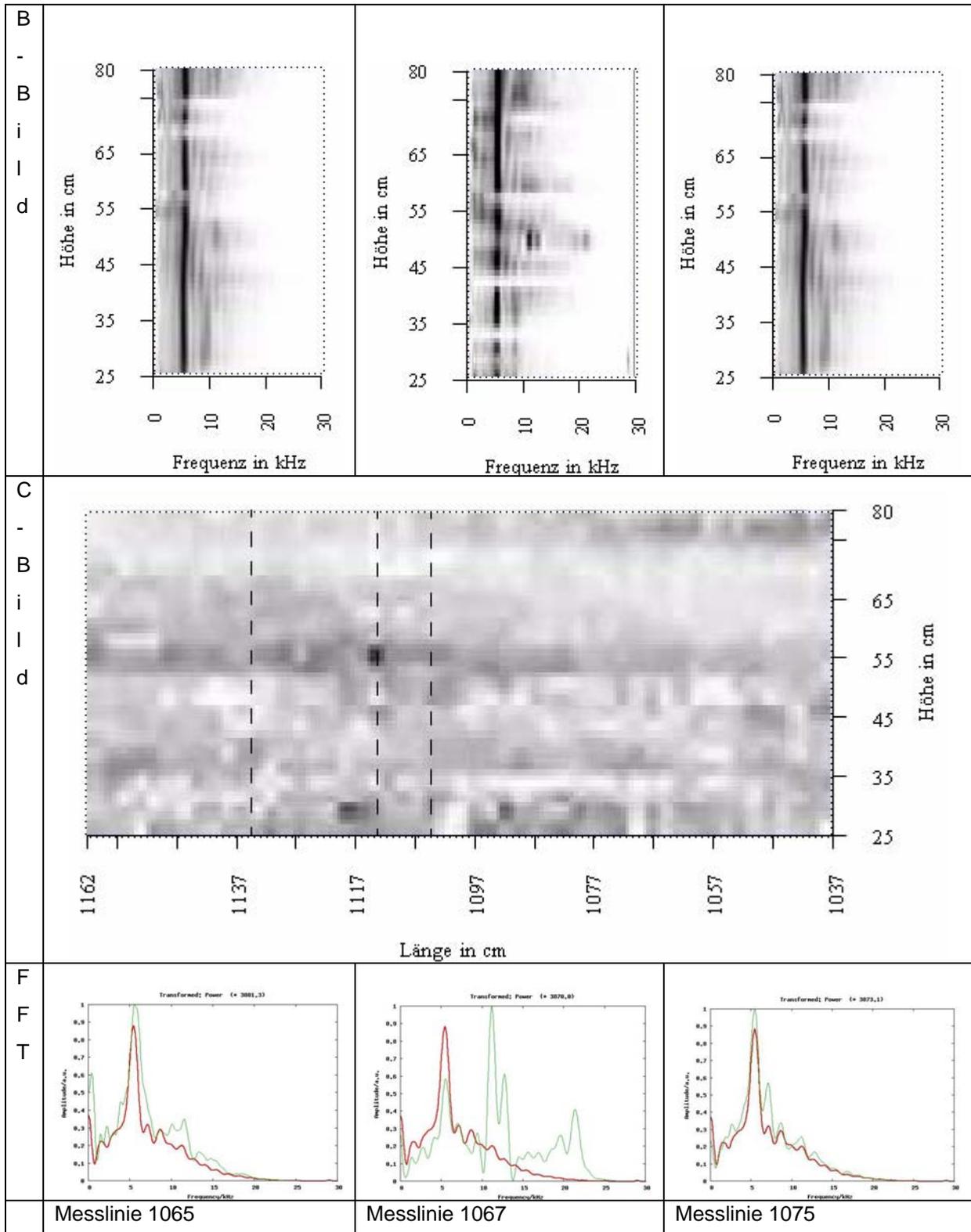
Bild 50 Messfeld 9: SAFT-C-Bilder eines Fusionsdatensatzes in einer Tiefe von 5 cm. Datensatz aufgenommen am Steg mit einer 1,5 GHz-Antenne.

8.4.2 Impakt-Echo

Neben der Ortung des Hüllrohres im Steg wurden die Messergebnisse auf weitere im Beton verborgene Reflektoren hin untersucht. In Feld 9 konnte im C-Bild bei 11,22 kHz eine Intensitätsspitze gefunden werden Tab. 3 mittlere Zeile. Betrachtet man den Messpunkt im Frequenzbereich Tab. 3 untere Zeile so ist neben dem Rückwandsignal bei 6kHz die oben genannte Anzeige bei 11,2 kHz sowie eine weitere Anzeige bei 21,5kHz zu sehen. Alle drei Anzeigen sind als Intensitätsmaxima auch im B-Bild Tab. 3 obere Zeile zu identifizieren sowie deren geringe Ausdehnung in Messrichtung. Zum Vergleich sind auch benachbarte Punkt- und B-Bildauswertungen angeführt, in denen die Anzeigen bei 11,2 sowie 21,5kHz nicht mehr auftreten.

Eine Auswertung der Tiefenlage ist nicht möglich, zum einen aufgrund der geringen lateralen Ausdehnung des Reflektors und der sich damit ergebenden Randeefekte, zum anderen, da Erfahrungen mit dem Übergang zu einem akustisch dichteren Medium fehlen. Bei dem Verifizierungstermin wurde an dieser Stelle im Messfeld 9 ein Bohrkern (BK9) gezogen; der Reflektor hatte eine Tiefenlage von 4 cm bei einem Durchmesser von 3 cm, siehe auch Kapitel 10.4 .

Tab. 3 B-Bilder und Fouriertransformierte in der oberen und unteren Spalte, Intensitätsplot (C-Bild) bei 11,22kHz von Feld 9 in der mittleren Spalte. Der Einfüllstutzen ist als dunkler Punkt in der Mitte der mittleren Linie zu sehen. Schwarz entspricht einer hohen Intensität. Die gestrichelten Linien geben die Orte der Schnitte an.



9 Validierungsmessungen

9.1 Allgemeines

Ziel der Validierungsmessungen ist eine möglichst präzise Angabe der vorhandenen Schallgeschwindigkeit von Transversalwellen und ihrer zugehörigen Messunsicherheit bzw. Streuung entlang des untersuchten Bauteils. Da bei den Untersuchungen nur die Schallgeschwindigkeit von Transversalwellen ermittelt wurde, ist im Weiteren nur noch von Schallgeschwindigkeit die Rede. Die Kenntnis des Streuverhaltens der Schallgeschwindigkeit entlang eines Bauteils, in diesem Fall entlang von vorgespannten Längsträgern, ist die grundlegende Voraussetzung für die Angabe der Unsicherheit mit der eine Bauteildicke als Messergebnis angegeben werden kann. Insbesondere für Transversalwellen existieren bislang wenige Auswertungen, die die Streuung der Schallgeschwindigkeit dokumentieren. Die durchgeführten Untersuchungen an ausgewählten Längsträgern der hier beschriebenen Brücke bilden eine Ergänzung der in [8] veröffentlichten Streuungen der Schallgeschwindigkeit, die an Fundamenten ermittelt wurde.

9.2 Schallgeschwindigkeit an Referenzpunkten

Zunächst wird die Schallgeschwindigkeit an sieben Referenzpunkten ermittelt, an denen die Dicke des Längsträgers in den Grenzen von ± 1 mm bekannt war. An jeder Referenzstelle wurden 10 Messungen unter Wiederholungsbedingungen (10 mal Ankoppeln des Ultraschallprüfgeräts, gleiche Stelle, gleicher Prüfer, gleicher Zeitpunkt) durchgeführt und die zugehörige Laufzeit aus den Datensätzen (ASCII-Dateien) abgelesen. Aus den gemessenen Laufzeiten wurde mit der bekannten Dicke an dieser Stelle der Mittelwert und die Standardabweichung für die Schallgeschwindigkeit für jede Referenzstelle ermittelt. Die Dicke wurde genau an der Messstelle bestimmt, indem der Längsträger nach der Messung senkrecht zu Oberfläche durchbohrt wurde und die Dicke direkt gemessen wurde. Die Ergebnisse sind in Tabelle Tab. 4 dokumentiert.

Erwartungsgemäß treten sehr kleine Streuungen auf, die im wesentlichen auf Abweichungen durch das 10-malige Ankoppeln des Messgeräts und die Messunsicherheit des Geräts zurückzuführen sind. Diese Streuung ist in Form der Standardabweichung in Tab. 4 angegeben. Dazu kommt noch die Unsicherheit aus der ungenauen Kenntnis der Bauteildicke an jeder Messstelle, die in den Grenzen von ± 1 mm bestimmt wurde. Daraus ergibt

sich nach GUM Typ B [9] unter Annahme einer Rechteckverteilung eine Standardabweichung von $1/\sqrt{3} = 0,6$ mm. Zusammen mit der maximalen Die Ermittlung der kombinierten Standardabweichung erfolgt nach der Gauß'schen Unsicherheitsfortpflanzung für die als unkorreliert angenommene Bauteildicke und Laufzeit.

Tab. 4 Ermittlung der Schallgeschwindigkeit für Transversalwellen und der zugehörigen Unsicherheit am Längsträger 2 (Westseite)

Punkt	R4.1	R5.1	R5.2	R6.1	R6.2	R7.1	R7.2
\bar{t} [μs]	257,7	250,1	247,0	255,4	252,1	258,8	272,2
u_t [μs]	0,7	0,6	0,5	0,8	0,4	0,8	0,8
d [mm]	358	357	356	357	35,6	362	362
u_d [mm]	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
\bar{v} [m/s]	2778	2855	2883	2796	2824	2798	2660
$u_{v,c}$ [m/s]	9 0,3%	6 0,2%	6 0,2%	9 0,3%	10 0,4%	9 0,3%	8 0,3%

\bar{t} : mittlere Laufzeit an der Referenzstelle

u_t : Unsicherheit der Laufzeitmessung (Standardabweichung); d : Bauteildicke; \bar{v} : mittlere Schallgeschwindigkeit (Transversalwellen); $u_{v,c}$: kombinierte Unsicherheit der Schallgeschwindigkeit

Die Schallgeschwindigkeit kann mit dem vorhandenen Ultraschallmessgerät für eine Stelle, an der mit geringer Unsicherheit die Bauteildicke bekannt ist, mit einer Standardabweichung von deutlich unter 1% sehr präzise angegeben werden.

Der Vergleich untereinander der sehr präzise an den einzelnen Referenzstellen ermittelten Schallgeschwindigkeiten zeigt deutlich größere Abweichungen. Diese Abweichungen sind der Streuung der Schallgeschwindigkeit des Betons infolge unterschiedlicher Verdichtung geschuldet. Um ein vollständiges Bild über die Streuung der Schallgeschwindigkeit entlang eines Bauteils zu erhalten, wurden Messlinien entlang der Längsträger aufgenommen. Die Ergebnisse sind im nachfolgenden Abschnitt dokumentiert.

9.3 Schallgeschwindigkeit entlang von Messlinien

Um die Streuung der Schallgeschwindigkeit entlang von Bauteilen zu quantifizieren, wurden entlang Träger 2 und Träger 3 je zwei Messspuren (oberhalb und unterhalb der Spannglieder) auf 10 m Länge in einem Abstand von 10 cm von Messpunkt zu Messpunkt untersucht. In Bild 51 sind die Reflexionen der Rückwand über der Laufzeit dargestellt. Man erkennt Abweichung der Rückwandreflexionen, die bei einer nahezu konstant vorhandenen Dicke primär auf die Streuung der Schallgeschwindigkeit entlang der Messlinie zurückzuführen sind.

Aus den Datensätzen (ASCII-Daten) wurde für jeden Messpunkt die gemessene Laufzeit abgelesen. Ebenso wurde an der Unterkante des Längsträgers für jeden Messpunkt die Dicke mit einem Messstab bestimmt. So konnte für jeden Messpunkt die Schallgeschwindigkeit berechnet

werden. Die Einzelergebnisse wurden in Histogrammen zusammengefasst, um die Streuung der Schallgeschwindigkeit grafisch ablesen zu können. Die Histogramme der ermittelten Schallgeschwindigkeiten sind für jede der insgesamt vier Messspuren an den Trägern 2 und 3 in Bild 52 dargestellt. Man erkennt, dass die Messlinien oberhalb der Spannglieder im Mittel zu etwas höheren Schallgeschwindigkeiten mit etwas geringerer Streuung tendieren, verglichen mit den Messlinien unter dem Spannglied.

Alle Einzelwerte wurden einer statischen Auswertung unterzogen, wobei der Mittelwert und die Standardabweichung berechnet wurde. Die aus diesen Parametern sich ergebende Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion (Gauß'sche Normalverteilung mit Mittelwert der Schallgeschwindigkeit als Schätzwert für μ und Standardabweichung als Schätzwert für σ) ist in Bild 52 dargestellt.

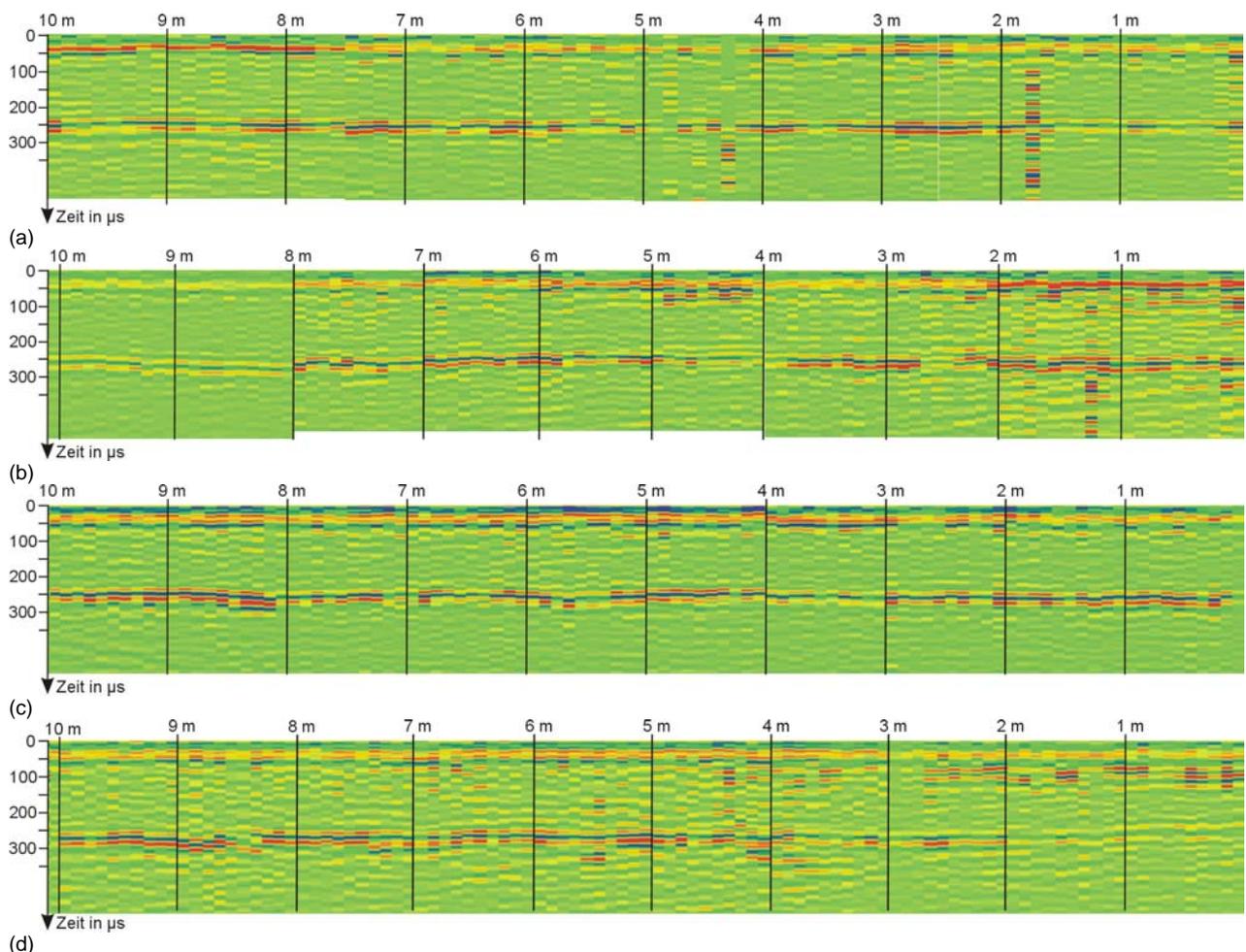


Bild 51 Anzeige der Rückwandreflexion entlang des Bauteils in Messschritten von 10 cm. (a) Längsträger 2, oberhalb und (b) unterhalb Spannglieder; (c) Längsträger 3, oberhalb und (b) unterhalb Spannglieder. Die Streuung der Rückwandreflexion ist primär der Streuung der Schallgeschwindigkeit des Betons geschuldet.

Abschließend werden alle Ergebnisse der Träger 2 und 3 in einem Histogramm in Bild 53 dargestellt. Hier wird deutlich, dass die Streuung der Schallgeschwindigkeit durch eine Gauß'sche Normalverteilung zutreffend dargestellt werden kann.

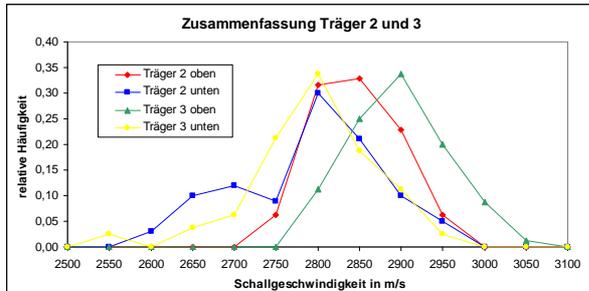


Bild 52 Histogramme der ermittelten Schallgeschwindigkeiten getrennt für jede der vier Messlinien

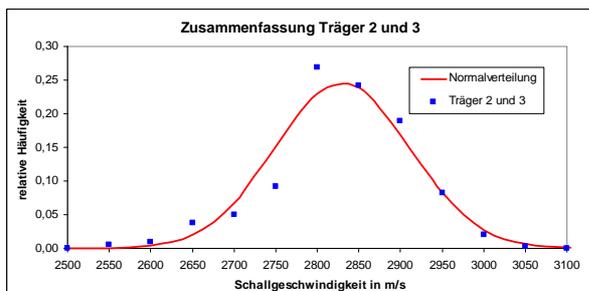


Bild 53 Histogramm der ermittelten Schallgeschwindigkeiten für alle vier Messlinien zusammen mit der ermittelten Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion

Für praktische Belange ergibt sich daraus die Schlussfolgerung, dass es zur Abschätzung der Streuung von Schallgeschwindigkeiten an großen Bauteilen zutreffend ist, eine Gauß'sche Normalverteilung anzunehmen und durch Berechnung des arithmetischen Mittelwerts und der empirischen Standardabweichung Schätzwerte für diese Verteilung bestimmt werden können.

Werden dagegen nur kleine Teile eines Bauteils betrachtet, kann es örtlich begrenzt zu starken Abweichungen der Schallgeschwindigkeit kommen. Dies wird in Bild 52 für „Träger 2, unten“ deutlich, wo eine Häufung reduzierter Schallgeschwindigkeiten mit Werten zwischen 2.650 und 2.700 m/s auftritt. Die reduzierten Schallgeschwindigkeiten entsprechen den größeren Laufzeiten, die an diesem Träger zwischen 8 und 10 m gemessen wurden und die in Bild 51 abzulesen sind. In diesem Fall kann es sein, dass unter Annahme einer Gauß'schen Normalverteilung die Schallgeschwindigkeiten zu günstig abgeschätzt werden. Abschließend werden die berechneten Mittelwerte und Standardabweichungen für jede einzelne

Messlinie und für alle vier Messlinien zusammen in Tab. 5 quantifiziert. Die Werte der Standardabweichungen können zur Abschätzung der Streuung von Schallgeschwindigkeit für vergleichbare Auswertungen herangezogen werden. Die Mittelwerte der Schallgeschwindigkeit für andere Bauteile mit abweichender Rezeptur sollten am jeweiligen Bauteil ermittelt werden. Wenn dort zu wenige Messwerte zur Ermittlung einer Standardabweichung zur Verfügung stehen, können die in Tabelle Tab. 5 dokumentierten Werte, zur Abschätzung der Streuung herangezogen werden.

Tab. 5 Zusammenfassung der Mittelwerte und Standardabweichungen der Schallgeschwindigkeiten für jede der vier Messlinien

	Mittelwert in m/s	Standardabweichung in m/s
Träger 2, oben	2.846	48 (1,7%)
Träger 2, unten	2.790	85 (2,0%)
Träger 3, oben	2.897	58 (3,0%)
Träger 3, unten	2.797	72 (2,6%)
Alle 4 Messlinien	2.830	81 (2,8%)

Im Vergleich zu den wesentlich kleineren Standardabweichungen in Tab. 4 wird deutlich, dass die Unsicherheit des verwendeten Messgeräts im Vergleich zur Unsicherheit aus der Streuung der Schallgeschwindigkeit von untergeordneter Bedeutung ist (präzises Messgerät, „unpräziser“ Baustoff).

10 Verifizierung der Messergebnisse

10.1 Allgemeines

Durch den nachfolgenden Abriss des Bauwerks konnten die Ergebnisse der zerstörungsfreien Messungen verifiziert werden. In diesem Abschnitt werden folgende ausgewählte Beispiele detektierter Objekte beschrieben:

- Ortung eines Querspannglieds in der Fahrbahnplatte von der Unterseite; Überdeckung von rd. 6 cm
- Ortung des Spannglieds der Längsträger („Hüllkasten“) und visuelle Bewertung des Verpresszustands; Überdeckung 12-13 cm
- Ortung eines im Längsträger befindlichen Einfüllrohrs; Überdeckung 4 cm, Durchmesser 3 cm
- Ortung von Spanngliedern im Querträger, die nicht im Bestandsplan verzeichnet waren; Überdeckung 14-15 cm.

Die örtliche Lage der Bohrkernentnahmestellen ist in Anlage 1 bis 3 dargestellt.

10.2 Querspannglied der Fahrbahnplatte

Bild 54 zeigt die Unterseite der Fahrbahnplatte mit der zerstörungsfrei georteten Lage des Querspannglieds vor der Bohrkernentnahme. Die Ergebnisse dieser Messstelle sind Abschnitt 8.2 beschrieben. Der entnommene Bohrkern ist in Bild 55 dargestellt. Er weist eine Länge von 20 cm auf, die der Dicke der Fahrbahnplatte entspricht. Zum Zeitpunkt der Bohrkernentnahme war die Asphalt-schicht bereits entfernt. Die visuelle Untersuchung ergab keinen Hinweis auf Verpressfehler. Die SAFT-Auswertung ergab, dass zur zuverlässigen Ortung von Verpressfehlern eine Mindestüberdeckung des Spannglieds von 10 cm vorliegen muss.

10.3 Spannglied im Längsträger

In Abschnitt 8.1 wurde der Verlauf des Spannglieds im Längsträger für die Messflächen 1 bis 9 ermittelt und bildgebend dargestellt. Dabei ergaben sich bei der Amplitudenauswertung keine Hinweise, die auf einen Verpressfehler hindeuten.

Repräsentativ für Bereiche des Hüllkastens außerhalb der Umlenkstellen mit einer Blechdicke von 1 mm ist in Bild 56a die Entnahmestelle der Bohrkern BK13 und BK14 dargestellt.

In Bild 56b und c sind die freigelegten Litzenbündel zu sehen, die nur Spuren von Flugrost aufweisen. Die Betondeckung der Litzenbündel zum Blech beträgt rd. 1 cm. Am Blech des Hüllkastens wurden ebenfalls Spuren von Flugrost gefunden. In der oberflächennahen Zone wurden keine Hinweise auf Verpressfehler gefunden.

Der oben beschriebene Befund wurde auch an den übrigen Stellen der Bohrkernentnahme (auch Umlenkstellen) BK5a und b, BK6a und b, BK8, BK15 und BK18 bestätigt. Die Gesamtheit der Bohrkernentnahmestellen ist in Anlage 1 dargestellt.



Bild 54 Entnahmestelle an der Unterseite der Fahrbahnplatte mit eingezeichneter Lage des Querspannglieds



Bild 55 Von der Unterseite der Fahrbahnplatte entnommener Bohrkern aus der Fahrbahnplatte mit Querspannglied, das eine vollständige Verpressung aufweist.

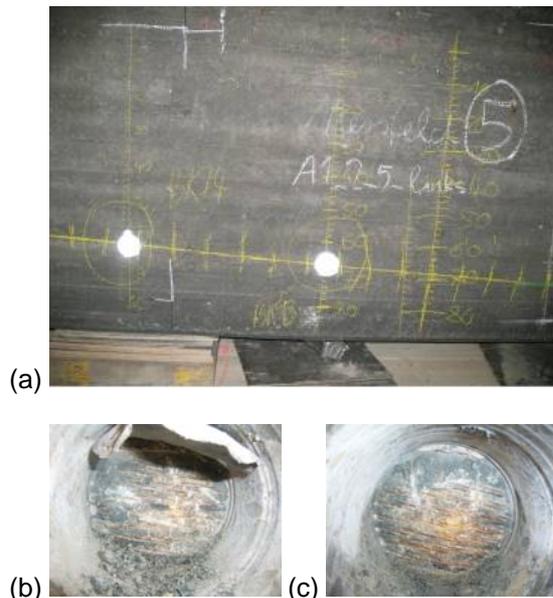


Bild 56 (a) Entnahmestelle am Längsträger mit eingezeichneter Lage des Spannglieds und Detailaufnahme des geöffneten Hüllkastens im Bereich von (b) BK13 und (c) BK14 ohne Hinweis auf erkennbare Verpressfehler.

10.4 Einfüllrohr im Längsträger

Bei der Auswertung der Radardaten wurde im Bereich der späteren Bohrkernentnahmestelle BK9 neben dem Längsspannglied ein deutlicher metallischer Reflektor identifiziert (Bild 57). Die vergleichende Auswertung der Ultraschallecho- und Impakt-Echo-Daten ergab keine Hinweise auf eine (mit Luft gefüllte) Fehlstelle. Bei der Bohrkernentnahme wurde wie in Bild 57b dargestellt ein in die Tiefe verlaufendes metallisches Hüllrohr gefunden, das als Injektionsrohr gedient hat. Die Lage des Rohrs konnte punktgenau angegeben werden.

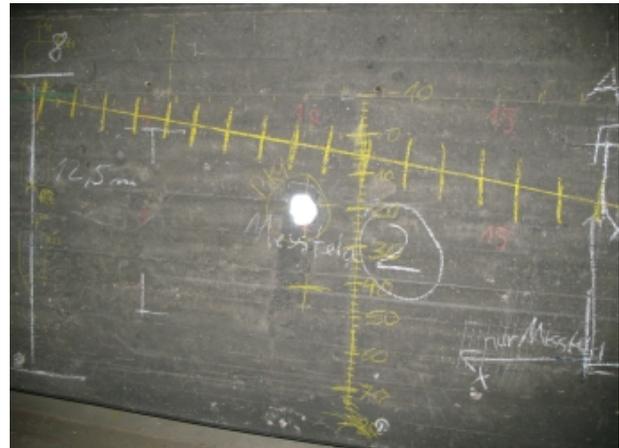


Bild 57 (a) Entnahmestelle BK9; (b) Freigelegter metallischer Reflektor an der Bohrkernentnahmestelle BK9.

10.5 Spannglieder im Querträger

Zur Verifizierung der vorhandenen Bestandsplanunterlagen wurde auch ein Messfeld an einem Querträger positioniert. Im Bestandsplan waren keine Querspannglieder verzeichnet. Die bildgebende Darstellung der Ultraschall- und Radarergebnisse (vgl. Abschnitt 8.3) ergab eindeutige Hinweise auf das Vorhanden von zwei Querspanngliedern im Bereich der Messfläche. Die Lage der Querspannglieder wurde wie in Bild 58a dargestellt auf der Bauteiloberfläche markiert. Die freigelegten Spannglieder sind in Bild 58b und c zu sehen. Hinweise auf Verpressfehler ergaben weder die Auswertung der Messungen noch der visuelle Befund. Die eingezeichnete Spanngliedlage entsprach genau der Lage des Hüllrohrscheitels.

11 Zusammenfassung

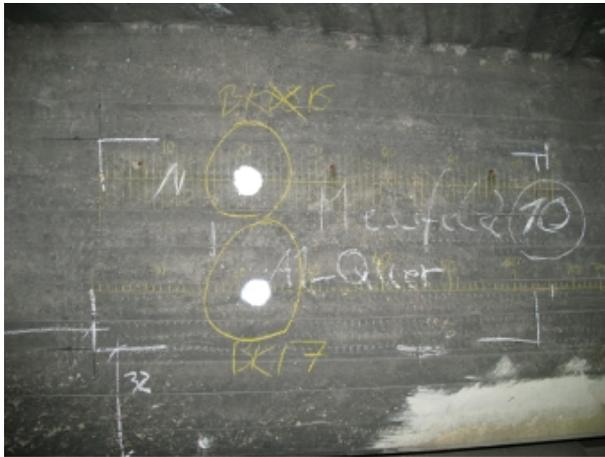
11.1 Bildgebende Darstellung der inneren Konstruktion

Die zusammenfassende Betrachtung der drei verwendeten Verfahren Ultraschallecho, Radar und Impakt-Echo zeigt deren Leistungsfähigkeit zur bildgebenden Darstellung des Inneren der Konstruktion auf einer Fläche von rd. 10 m².

Mit **Radar** gelingt die Darstellung der oberflächennahen Bewehrung erwartungsgemäß am Besten. Aufgrund des geringen Anteils an konstruktiver Bewehrung wie er in Brücken aus dieser Zeit durchaus üblich ist und einer Bauteildicke von nur 36 cm gelingt auch die Darstellung der rückseitigen Bewehrung des Stegs bzw. Längsträgers. Auch der Hüllkasten des in Stegmitte liegenden Spannglieds der Bauart Baur-Leonhardt wird deutlich abgebildet. Dabei ist die Abschattung so gering, dass die rückseitige Bewehrung sichtbar bleibt. Über den Aufbau des Inneren des Hüllkastens mit seiner metallischen Ummantelung kann Radar physikalisch bedingt keinen Aufschluss bieten. Dazu ist der Einsatz der beiden akustischen Verfahren Ultraschallecho und Impakt-Echo erforderlich.

Mit **Ultraschallecho** kann die Lage des Hüllkastens ebenso deutlich und präzise dargestellt werden wie mit Radar. Darüber hinaus können Informationen über den Aufbau des Hüllkastens gewonnen werden. Die Umlenkstellen des Hüllkastens weisen eine größere Blechdicke von 4 mm und einen zweischichtigen Aufbau verglichen mit den normalen Blechkästen mit 1 mm Wanddicke auf. Aufgrund einer schwächeren ersten Reflexion an der Oberfläche des Hüllkastens kann die Lage der Umlenkstellen detektiert werden. Die Ursachen für die unterschiedlichen Signalformen von Hüllkasten und Umlenkstelle konnten noch nicht vollständig erklärt werden.

Impakt-Echo erlaubt wie Ultraschallecho eine Unterscheidung des Spanngliedverlaufs in Umlenkstelle und normalen Blechkastenaufbau. Wie bei der Auswertung von Impakt-Echo üblich erfolgt die Lokalisierung des Spannglieds über den Betrag der Verschiebung der Rückwandanzeige zu niedrigeren Frequenzen. Die Umlenkstellen weisen eine geringere Verschiebung der Rückwandanzeige auf als die übrigen Bereiche mit einlagigem Blech. Aufgrund der großen Abmessungen des rechteckigen Hüllkastens von rd. 13 cm Kantenlänge ist eine direkte Ortung des Hüllkastens möglich. Die Auswertung der Anzeige der direkten Reflexion der Oberfläche des Hüllkastens ist aber – wie die Auswertung auf rd. 11 m Länge zeigt – nicht so zuverlässig, wie die Auswertung der Verschiebung



(a)



(b)



(c)

Bild 58 (a) Zerstörungsfrei geortete und auf dem Querträger eingezeichnete Lage der beiden Querspannglieder. (b) und (c) zeigt jeweils das freigelegte Spannglied von BK16 und BK17 ohne Hinweise auf Verpressfehler.

der Rückwandanzeige. Daraus wird die Empfehlung abgeleitet, zur zuverlässigen Ortung der Lage von Spanngliedern die Auswertung der Verschiebung der Rückwandreflexion heranzuziehen. Auf die Auswertung der direkten Reflexion sollte – sofern sie überhaupt möglich ist – verzichtet werden. Die Querspannglieder der Fahrbahnplatte, die an der breiten Seite einen Durchmesser von rd. 45 mm aufweisen, konnten aufgrund des geringen Durchmessers nicht geortet werden.

Bei den Impakt-Echo-Messungen an der Fahrbahnplatte wurde festgestellt, dass Erschütterungen durch LKW-Verkehr, die Messungen gestört haben. Dies lag daran, dass die Auslenkungen der Störungen genau in Sensorrichtung auftrafen. Bei Messungen an vertikalen Fläche (Stege, Längsträger) sind diese Störungen erwartungsgemäß nicht aufgetreten.

Aufgrund des geringen Anteils an konstruktiver Bewehrung im oberflächennahen Bereich liefern Ultraschall und Radar gleichwertige Ergebnisse bezüglich der Güte der Darstellung des Hüllkastens und der Querspannglieder. Für Brückenbauwerke neueren Datums mit einem größeren Anteil an oberflächennaher Bewehrung liefert Ultraschallecho deutlichere Ergebnisse hinsichtlich des Spanngliedverlaufs insbesondere bei mehrlagigem Spanngliedverlauf [4].

Besonders hervorzuheben ist die Klarheit der Impakt-Echo-Ergebnisse, mit der die Lage der Hüllkästen detektiert werden konnte und eine zuverlässige Unterscheidung in Umlenkstelle und normalen Hüllkastenaufbau möglich war.

Geht es nur um die **Darstellung der schlaffen Bewehrung und der Spannglieder**, so war dies an diesem Bauwerk aufgrund des geringen Anteils an oberflächennaher Bewehrung **allein mit Radar** möglich. Allerdings ist eine Datenaufnahme in zwei Polarisationsrichtungen und eine Rekonstruktionsrechnung erforderlich, um die Bewehrung in allen Richtungen bildgebend darstellen zu können. Ist der Anteil oberflächennaher Bewehrung größer, das Bauteil dicker und sollen **Aussagen zum Verpresszustand** gemacht werden, muss die Verfahrenskombination aus **Radar und Ultraschallecho** eingesetzt werden. Dazu wird künftig eine Vorgehensweise anvisiert, nur die weniger zeitintensiven Radarmessungen vollflächig durchzuführen und die zeitaufwändigeren akustischen Messungen (Ultraschallecho, ggf. Impakt-Echo) auf die Flächen oberhalb der Spannglieder zu beschränken. Dazu ist die Entwicklung von entsprechender Software zur Steuerung der Brückenscanner erforderlich, die Gegenstand der weiteren Forschungs- und Entwicklungsarbeit ist. Die Genauig-

keit der nach Auswertung von Radar und Ultraschallecho erhaltenen Lage der schlaffen Bewehrung und der Hüllrohre in auf ± 1 cm genau, wie die spätere Entnahme von Bohrkernen bewies. In der Praxis besteht die Schwierigkeit darin, die präzise bestimmte Lage der lokalisierten Objekte ortsgenau auf das Bauteil zu übertragen.

Als sehr leistungsfähig und wenig zeitaufwändig hat sich auch das eingesetzte **Lineararray** herausgestellt, das eine **SAFT-Rekonstruktion direkt vor Ort** durchführt. Eine Messposition erzeugt bereits ein SAFT-rekonstruiertes Abbild des Querschnitts unter dem Array. Mehrere dieser Messpositionen können dann zu einem 3-D-SAFT-Bild zusammengefasst werden. Im vorliegenden Fall konnte im Gegensatz zu den Scanneruntersuchungen das tiefer liegende Spannglied in etwa 40 cm Tiefe geortet werden.

Bei dem untersuchten Brückenbauwerk wurde deutlich, dass die eingesetzten Verfahren in der Lage sind, tatsächlich vorhandene innere Konstruktion bestehend aus schlaffer Bewehrung und Spanngliedern realitätsgetreu darzustellen. Damit erschließt sich die Möglichkeit, **vorhandene Bestandspläne durch die Kombination von ZfPBau-Verfahren in Kombination mit Rekonstruktionsrechnungen zu überprüfen bzw. fehlende Bestandspläne neu zu erstellen**. Bei dem untersuchten Querträger wurden Spannglieder gefunden, wo in den Ausführungsplänen gar keine Spannglieder verzeichnet waren. Damit rekonstruierte Planunterlagen auch mit dem Durchmesser der schlaffen Bewehrung versehen werden können, ist vorgesehen bei der künftigen Scannerentwicklung das Wirbelstromverfahren einzubinden.

11.2 Ortung von Verpressfehlern

Aufgrund der Untersuchungen des zuvor abgebrochenen Überbaus in Fahrtrichtung Köln wurde auch für den hier untersuchten Überbau in Fahrtrichtung Bremen von erheblichen Verpressfehlern in den Querspanngliedern und in den Längsspanngliedern ausgegangen. Dieser Verdacht hat sich bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht bestätigt und wurde durch Bohrkernentnahme verifiziert.

Eine zuverlässige Ortung von Verpressfehlern ist nach derzeitigem Stand nur mit dem **Ultraschallechoverfahren** und einer gesonderten Auswertung zu erwarten. Dabei ist eine einfache **Amplitudenauswertung** (intensive Reflexionen an in der Tiefenlage des Hüllrohrs gelten als Verdachtsstelle) zur Ortung von Verpressfehlern nicht zuverlässig. Zusätzlich ist eine **Phasenauswertung**

vorzunehmen, die über die Änderung der Phasenlage des Signals Auskunft gibt und es ermöglicht, festzustellen, ob eine Reflexion von der Grenzfläche Mörtel/Stahl (intakte Stelle) oder Stahl/Luft (Verpressfehler) stammt.

Dabei haben die **Modellrechnungen** gezeigt, dass das Kriterium der Phasenlage nicht einfach pauschal angewendet werden kann. Aufgrund der vorliegenden komplexen Geometrie des Hüllkastens, seines z. T. mehrschichtigen Aufbaus, seinen hohen Füllgrads mit Spannstahl und der vorhandenen Tiefenlage kommt es zu Mehrfachreflexionen, Überlagerungen und Auslöschungen von Signalanteilen, die eine Ergebnisinterpretation ohne vorherige Modellrechnung unzuverlässig machen. Dazu kommt noch der Umstand, dass bislang keine Kenntnisse zerstörungsfreier Untersuchungen an einer Brücke mit dem System Baur-Leonhardt vorlagen. Aus diesem Grund wird empfohlen, bei ähnlich komplexen Geometrien über die bzgl. ZfP wenig Erfahrung existiert, Modellrechnungen für die Fälle schadfreier Zustand und Verpressfehler durchzuführen, um die zu erwartenden Messergebnisse vorhersagen zu können, eine Verbesserung der Messparameter zu ermöglichen und eine zuverlässigere Ergebnisinterpretation sicherstellen zu können.

Selbst nach Durchführung der Phasenauswertung ergaben sich keine Hinweise auf Verpressfehler im Hüllkasten des Längsspannglieds. Diese Einschätzung wurde durch das Öffnen des Hüllkastens an Umlenkstellen und normalem Hüllkastenverlauf sowie an Stellen mit charakteristischen Signalen bestätigt. Keine der geöffneten Stellen des Hüllkastens oder der entnommenen Kerne im Bereich der Querspannglieder deuten auf Verpressfehler hin.

Die Untersuchung der Fahrbahnplatte und die nachfolgende Phasenauswertung ergab, dass zuverlässige Aussagen zu Verpressfehlern in der vorliegenden geringen Hüllrohrtiefe von 6 cm nicht möglich sind. Als **Mindesttiefe für Hüllrohre zur zuverlässigen Phasenauswertung** wird derzeit von 10 cm ausgegangen. Sofern die Mindesttiefe nicht eingehalten werden kann, besteht die Möglichkeit statt der Prüfkopffarrays aus Punkt-Kontakt-Prüfköpfen ein modifiziertes Array zu nutzen, das als „**Nahfeldprüfkopf**“ bezeichnet wird. Diese Prüfkopfart steht der BAM zwischenzeitlich zur Verfügung und wird an ersten Objekten eingesetzt.

11.3 Validierungsmessungen

Ziel der Validierungsmessungen ist eine möglichst präzise Angabe der vorhandenen Schallgeschwin-

digkeit und ihrer zugehörigen Messunsicherheit bzw. Streuung entlang des untersuchten Bauteils. Die Kenntnis der mittleren Schallgeschwindigkeit des untersuchten Bauteils und deren Streuung sind dann von Bedeutung, wenn aus den Ergebnissen zuverlässig die Bauteildicke oder die Tiefenlage eines Spannglieds bestimmt werden soll. Wie in der Auswertung gezeigt wurde, ist die ermittelte Streuung der Schallgeschwindigkeit im Beton vorzugsweise der herstellungsbedingten ungleichmäßigen Verdichtung des Betons geschuldet. Hier wurde für den untersuchten Längsträger bzw. Steg eine Standardabweichung der Schallgeschwindigkeit von rd. 3% ermittelt. Streuungen der Messergebnisse durch Abweichungen des Messgeräts sind deutlich geringer als 0,5% Standardabweichung und damit von untergeordneter Bedeutung. Dabei wurde der Einfluss der Streuung der Bauteildicke herausgerechnet.

Das bedeutet für die Angabe von Bauteildicken oder der Tiefenlage von Objekten innerhalb des Bauteils, dass Abweichungen von mindestens 3% durch Streuung der Schallgeschwindigkeit im Beton zuzüglich der Abweichungen der unplanmäßigen Schwankung der Bauteildicke zu berücksichtigen sind. Damit wird deutlich, dass die Genauigkeit einer Messung mit einem präzisen Messgerät maßgeblich durch das „unpräzise“ Bauteil mit seiner Streuung der Bauteildicke und der Verarbeitungsqualität (Schallgeschwindigkeit) bestimmt wird. Das bedeutet, dass die Präzision einer Messung in aller Regel durch das Bauteil und nicht durch das Messverfahren bestimmt wird.

Vereinfacht kann nach GUM [9] folgende Überlegung angestellt werden: Nimmt man die Standardabweichung der abweichenden Bauteildicke mit 1% an, so ergibt sich daraus zusammen mit den zuvor ermittelten 3% Standardabweichung durch Streuung der Schallgeschwindigkeit auf der sicheren Seite liegend eine resultierende Gesamtstandardabweichung von 5%. Diese ist zu beachten, wenn an einer Stelle, z. B. oberhalb eines Spannglieds, eine Bohrtiefe angegeben wird und mit einem bestimmten Vertrauensniveau ein Treffer vermieden werden soll. Wird die Tiefe beispielsweise mit 20 cm bestimmt, so liegt die tatsächliche Dicke an dieser Stelle bei einem Vertrauensniveau von 95% zwischen bei 20 cm +/- 2 cm (zweifache Standardabweichung). Soll ein Sicherheitsniveau von 99% erzielt werden so ergeben sich 20 cm +/- 3 cm (dreifache Standardabweichung). Im ersten Fall wird eine Bohrtiefe von 18 cm im zweiten Fall eine Bohrtiefe von 17 cm gewählt. Die Überlegung kann auf die Angabe einer Bauteildicke aus Messergebnissen zur Verwendung in einer Statik auf einem ge-

forderten Vertrauensniveau herangezogen werden. Damit wird deutlich, dass durch eine Kenntnis der Messunsicherheit belastbare Aussagen aus den Messergebnissen auf einem geforderten Vertrauensniveau getroffen werden können.

11.4 Ortung von auffälligen Objekten

Wie auch bei frühen zerstörungsfreien Untersuchungen und der Kombination der Verfahren Radar, Ultraschallecho und Impakt-Echo gelingt mit den beiden erstgenannten die direkte Ortung von Spanngliedern. Mit Impakt-Echo gelang beispielsweise die direkte Ortung des Hüllkastens, wobei sich aber die klassische Auswertung der Verschiebung der Rückwand als zuverlässigeres Kriterium herausgestellt hat. Wenn die Durchmesser jedoch im Verhältnis zur Tiefenlage zu klein werden, wie hier im Fall der Fahrbahnplatte mit 4,5 cm können Spannglieder mit Impakt-Echo nicht direkt geortet werden.

Außerhalb der Spannglieder lieferten die Verfahren auffällige Signale, die wie in Abschnitt 10 beschrieben, detailliert untersucht wurden. Ob es sich bei einer auffälligen Stelle um einen metallischen Reflektor oder um eine luftgefüllte Fehlstelle handelt, kann durch den direkten Vergleich von Ultraschallecho mit Radar festgestellt werden. Die Schwierigkeit besteht darin, in den Datensätzen der beiden Messungen den exakt gleichen Punkt am Bauwerk zu finden. Dies kann dadurch erleichtert werden, dass die Ergebnisse kombinierter Messungen in den gleichen dreidimensionalen Datenkubus geschrieben werden. Dort können Sie dann ortgenau verglichen oder auch fusioniert werden. Für eine solche vergleichende Darstellung ist ein geeigneter dreidimensionaler Datenbrowser erforderlich. Ein solcher wird im Rahmen des Forschungsprojekts OSSCAR konzipiert und in das Scannersystem integriert. Die Möglichkeiten einer solchen dreidimensionalen Darstellung ist in Anlage 1 (unten) dargestellt. Die Ansicht kann im zugehörigen Programm beliebig gedreht werden.

11.5 Aktueller Stand der Wissenschaft und Technik und Ausblick

Bei der bildgebenden Darstellung der Bauteilgeometrie, der schlaffen Bewehrung und der Spannglieder hat sich die Verfahrenskombination von Radar und Ultraschall als zuverlässig und praktikabel erwiesen. Der Einsatz von Impakt-Echo bringt gegenüber Ultraschallecho keinen wesentlichen Informationsgewinn, obwohl im vorliegenden Fall gute Ergebnisse zur Identifizierung der Umlenkstellen erzielt wurden. Impakt-Echo kann dann zusätzlich parallel zu Ultraschallecho eingesetzt werden. Um den heutigen Kenntnis-

stand zum Stand der Technik zu machen, bedarf es einfach zusammensetzbarer, robuster und leicht zu bedienender Baustellenscanner. Die Auswertungsalgorithmen und die Ausgabe von Bildern der Ergebnisse müssen in diesen Messsystemen integriert werden, so dass Ergebnisse zur inneren Konstruktion noch auf der Baustelle vorliegen. Die Entwicklung solcher bedienerfreundlicher Systeme ist in Gang und wird beispielsweise mit dem im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten innoNet-Projekts OSSCAR (Entwicklung eines **On-Site SCAnneRs**) umgesetzt. Am Ende der Laufzeit Ende 2010 soll ein Gerät zur Verfügung stehen, das im Rahmen der „objektbezogenen Schadensanalyse“ (OSA) bei der Prüfung von Brücken nach DIN 1076 eingesetzt werden kann. Die Anwendung des Brückenscanners im Rahmen der OSA und durch Erwähnung im Leitfaden – vergleichbar mit dem Belastungsfahrzeug BELFA – kann der Einsatz dieser Technologie zum Stand der Technik werden.

Während bei Radar eine Datenaufnahme in zwei Polarisationsrichtungen heute bereits Stand der Technik ist, wird dies bei Ultraschallecho mit Transversalwellen noch nicht angewendet. Dazu bedarf es der Entwicklung von Sensoren, bei denen der gleiche Sensor an der gleichen Messposition nacheinander in beide Richtungen polarisiert wird. Zusätzlich ist eine Messung mit Longitudinalwellen denkbar. Hier muss allerdings zuerst die gerätetechnische Entwicklung erfolgen.

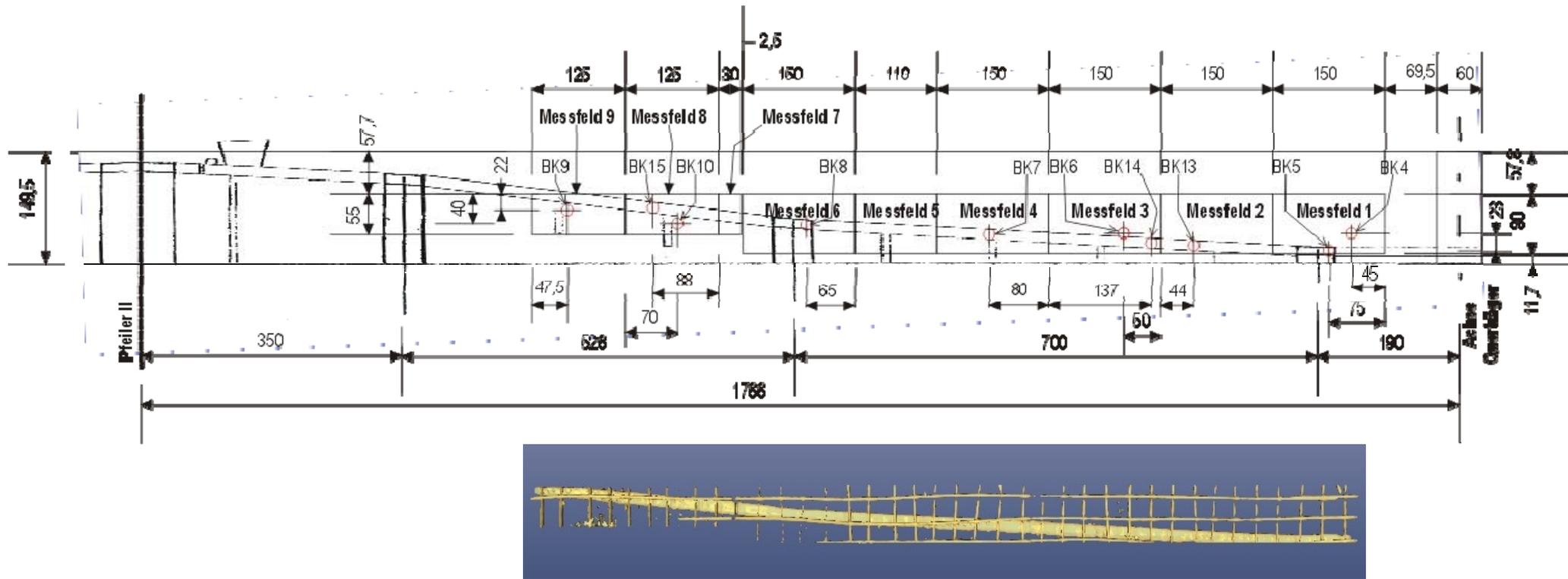
Die Anwendung der Phasenauswertung in Ergänzung zur Amplitudenauswertung stellt derzeit noch den Stand der Wissenschaft dar. Vorliegende Ergebnisse aus Messungen an Testkörpern mit Verpressfehlern zeigen die Eignung der Phasenauswertung diese zuverlässig zu orten. Am vorliegenden Bauwerk konnte mangels vorhandener Verpressfehler lediglich gezeigt werden, dass die Phasenauswertung keinen falschen Verdacht auf Verpressfehler liefert, wenn eine Mindesttiefe des Hüllrohrs von 10 cm eingehalten wird.

Literatur

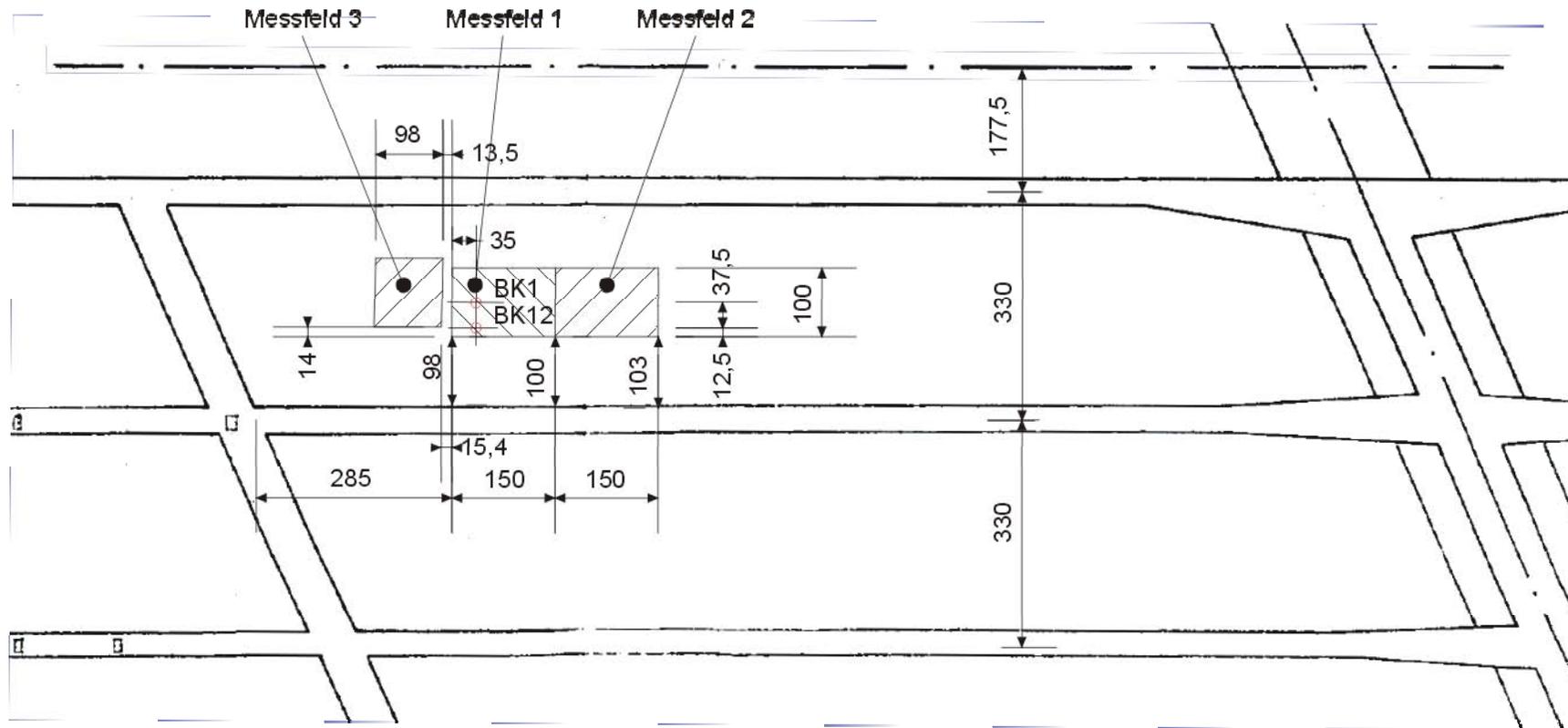
- [1] Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse, OSA, BAST 2004 (Download unter www.bast.de Stichwort: Fachthemen)
- [2] Streicher, D., Wiggerhauser, H., Holst, R., Haardt, P.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen - Automatisierte Messungen mit Radar, Ultraschallecho und Impact-Echo an der Fuldataalbrücke, in: Beton- und Stahlbetonbau

- 100 (2005) 3, 216-224; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin
- [3] Streicher, D., Algernon, D., Behrens, M., Kohl, Ch., Wöstmann, J., Wiggenhauser, H., Petz, J.: Großflächige ZfPBau-Untersuchungen an Hohlkastenbrücken der A 23 - Südosttangente Wien: BAM-Forschungsbericht (2006) 278, 46 Seiten; Wirtschaftsverlag NW / Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven; Hrsg.: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
- [4] Streicher, D., Kohl, Ch., Wiggenhauser, H., Taffe, A.: Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken, in: Zeitschriftenartikel: Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006) 5, 330-342; Ernst, Berlin
- [5] Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B., Mayer, K.: Objektabbildung mit scannenden Ultraschallecho-Verfahren, Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 8, S. 543-555
- [6] Milmann, B., Krause, M., Mielentz, F., Mayer, K.: Ultraschallecho-Verfahren für Spannbeton: Signifikanter Nachweis von Verpressfehlern mit Phasenauswertung, in: Tagungsband zur Bauwerksdiagnose 2008, Berlin, 21.-22.02.2008, DGZfP BB 112-CD, Poster 11
- [7] Mayer, K., Langenberg, K.-J., Krause, M., Maierhofer, Ch., Milmann, B. and Ch. Kohl, Characterization of Ultrasonic and Radar Reflector Types in Concrete by Phase Evaluation of the Signal and the Reconstructed Image, in: Proceedings of the 9th European Conference on NDT, September 25-29, 2006, Berlin: DGZfP, BB 103-CD, We.1.3.4
- [8] Taffe, A.: Dickenmessung von Fundamenten und Ermittlung der Messunsicherheit in Bergmeister, K. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 12, S. 573-581
- [9] Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, deutsche Übersetzung: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen, Beuth-Verlag, Berlin (1995)
- [10] Christian U. Große, Ralf Beutel, Stuttgart Herbert Wiggenhauser, Daniel Algernon, Berlin Frank Schubert, Dresden: Impact-Echo in Bergmeister, K. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 3.3.3, S. 503-505
- [11] Friese, M., Mielentz, F., Wiggenhauser, H.: Ultraschall-Linienarray zur Untersuchung von Betonbauteilen, in: Tagungsband zur Bauwerksdiagnose 2008, Berlin, 21.-22.02.2008, DGZfP BB 112-CD, Poster 9
- [12] Kohl, C., Krause, M., Maierhofer, C., Wöstmann, J und H. Wiggenhauser: Datenfusion komplementärer Impuls-Echo Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Betonbauteilen, in: DACH-Jahrestagung, 17.-19. Mai 2004, Salzburg, A, Berlin: DGZfP BB-CD 89

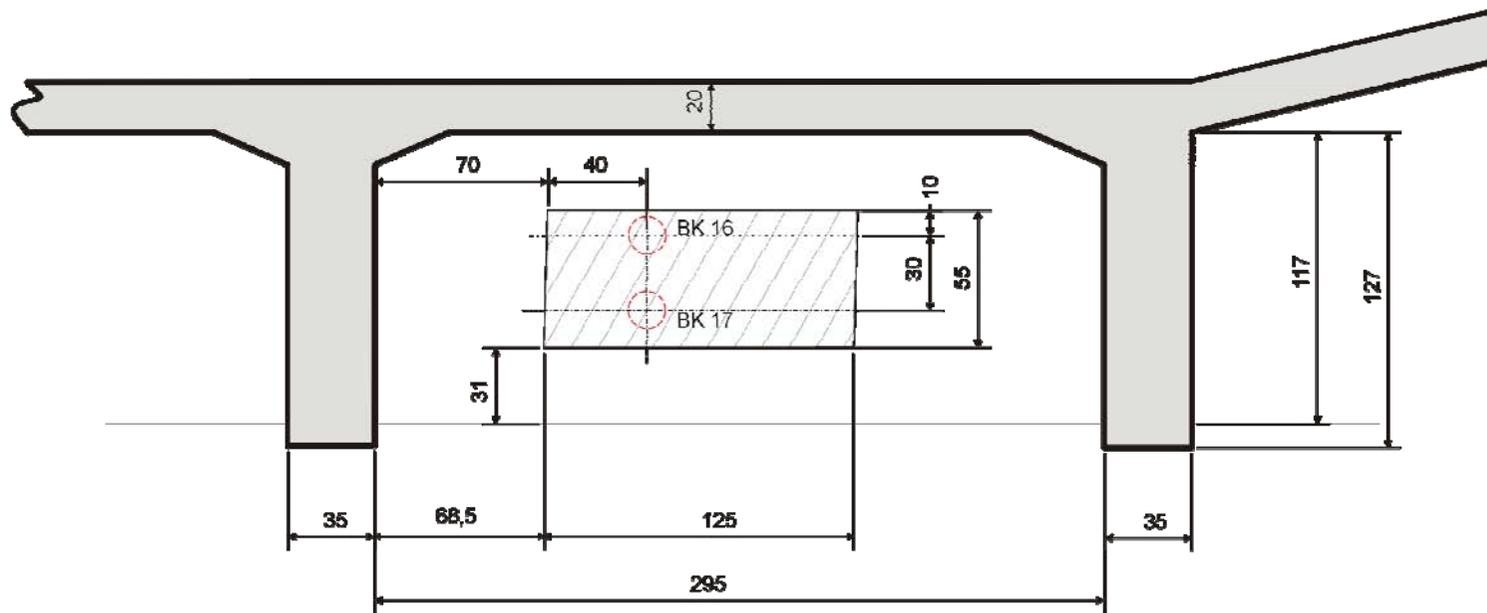
Anlage 1



Anlage 1: Längsträger bzw. Steg mit örtlicher Lage der Bohrkernentnahmestellen (oben). Fusionierter Datensatz aus Radarmessungen mit zwei Polarisationsrichtungen dreidimensional dargestellt (unten)



Anlage 2: Fahrbahnplatte mit örtlicher Lage der Bohrkernentnahmestellen



Anlage 3: Querträger örtlicher Lage der Bohrkernentnahmestellen

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

1993

- B 1: Realkalisierung karbonatisierter Betonrandzonen
Budnik, Laakkonen, Maaß, Großmann vergriffen
- B 2: Untersuchungen an Fertigteilbrücken BT 70/BT 700
Haser kostenlos
- B 3: Temperaturunterschiede an Betonbrücken
Knabenschuh vergriffen
- B 4: Merkblatt zur Entnahme repräsentativer Strahlschuttproben
MES-93 € 9,00

1994

- B 5: Spezielle Probleme bei Brückenbauwerken in den neuen
Bundesländern
von H. Haser, R. Kaschner
Teil 1: Nachrechnung von Gewölbebrücken
Teil 2: Schubsicherung bei Fertigteilträgern BT 70 und BT 50
Haser, Kaschner € 11,50

1995

- B 6: Zur Berechnung von Platten mit schwacher Querbewehrung
Kaschner € 11,50
- B 7: Erprobung von dichten lärmindernden Fahrbelägen für
Brücken
Sczyslo € 12,50
- B 8: Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbelag-
platte
Krieger, Rath € 17,50
- B 9: Anwendung von zerstörungsfreier Prüfmethode bei Beton-
brücken
Krieger € 13,00
- B 10: Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln
Maaß, Krieger € 12,50

1996

- B 11: Fahrbeläge auf Sohlen von Trogbauwerken
Wruck € 12,00
- B 12: Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkir-
chener Brücke
Goebel € 15,50
- B 13: Strukturanalyse von Beton
Gatz, Gusia € 11,00

1997

- B 14: Verhalten von Fahrbelägen aus Asphalt infolge Ho-
rizontallasten
Krieger, Rath € 16,00
- B 15: Temperaturbeanspruchung im Beton und Betoneratz beim
Einbau von Abdichtungen
Großmann, Budnik, Maaß € 14,50
- B 16: Seilverfüllmittel – Mechanische Randbedingungen für Brük-
kenseile
Eilers, Hemmert-Halswick € 27,50
- B 17: Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonisierungstiefe
und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Gusia, Kuhl € 14,00

1998

- B 18: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode
für Betonbrücken
Krieger, Krause, Wiggenhauser € 16,50
- B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten Be-
schichtungen
Schröder € 11,00
- B 20: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl
Eilers, Ritter € 12,50
- B 21: Windlasten für Brücken nach ENV 1991-3
Krieger € 10,50

1999

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbauwerken
Haardt € 11,50
- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger Un-
tergründe
Schröder, Sczyslo € 11,00
- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünn-
beläge auf Stahl
Eilers, Stoll € 11,00
- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von
Brücken- und Ingenieurbauwerken
Haardt € 12,50
- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerks-
prüfung
Krieger, Rath, Berthold € 10,50
- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen
Dünnbelägen
Eilers, Ritter, Stoll € 11,00

2000

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen
Dünnbelägen auf Stahl
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbo-
natisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutions-
arme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen
mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitäts-
kategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen
Fahrbelagplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbelag-
beläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2002

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbelagübergänge aus Asphalt
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Tal-
brücke Haiger
Krause, Wiggenhauser, Krieger € 17,00

B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti
von Weschpfennig € 11,50

B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahr-
tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Küchler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Städling, Krocker € 12,00

B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das
deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50

B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmert-Halswick, Ullrich € 12,50

B 45: Erfahrungssammlungen:
Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken
aus wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brückenseilen und -kabeln
Hemmert-Halswick € 13,00

2004

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im
Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von
Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann,
Wiggenhauser € 15,00

B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf-
tung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50

B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für
das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50

B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen
Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50

B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der
Haffestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staeck € 14,50

B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im
Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur
Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähner € 12,50

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination
mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von
Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der
Expositionsklasse XF2

Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der
Durchführung und Auswertung

Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50

B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel
Sistenich € 14,50

2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme
Schröder € 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teiler-
neuerung - Bewährung
Schröder € 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutz-
plankenpfosten
Schröder, Staeck € 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unter-
füllstoff
Eilers € 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an
einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4
Bramshuber, Spörel, Warkus € 12,50

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk
A1 Hagen/Schwerte
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoëga € 14,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.