

Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 48

The logo for the Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST) is displayed in a bold, green, lowercase sans-serif font. The letters are closely spaced and have a slight shadow effect, giving it a three-dimensional appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke

von

Ralph Holst

Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)
Bergisch Gladbach

Doreen Streicher
André Gardei
Christoph Kohl
Jens Wöstmann
Herbert Wiggerhauser

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 48

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, Referat 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, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 03243 des Arbeitsprogrammes der Bundesanstalt für Straßenwesen:
Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke

Herausgeber

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

Redaktion

Referat 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 3-86509-424-7

Bergisch Gladbach, Dezember 2006

Kurzfassung – Abstract

Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke

Die Bauwerke der Bundesfernstraßen (Brücken, Tunnel, Lärmschutzwände) sind gemäß DIN 1076 regelmäßig zu überprüfen. Bei der alle sechs Jahre stattfindenden Hauptprüfung sind diese Bauwerke handnah zu untersuchen und die Schäden nach Standsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit zu bewerten.

Allerdings lassen sich versteckte Schäden bzw. Ursachen von sichtbaren Schäden nicht immer erkennen. Aus diesem Grund sind in den vergangenen Jahren verstärkt Anstrengungen auf dem Gebiet der zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) im Bauwesen unternommen worden. Hierbei haben die Verfahren Radar, Impact-Echo und Ultraschall ihre prinzipielle Einsatzfähigkeit zur Schadenserkundung bzw. -bewertung bewiesen. Allerdings haben die einzelnen Verfahren ihre bestimmten Einsatzgrenzen bzw. Randbedingungen, die zu beachten sind. Zudem ist der Einsatz dieser Verfahren zur Untersuchung größerer Flächen sehr zeit- und personalintensiv und erzeugt zurzeit noch nicht unerhebliche Kosten. Aus diesem Grund hat die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung einen Baustellenscanner entwickelt, der es ermöglicht, automatisiert eine größere Fläche eines Bauwerks mit den o. a. Verfahren der ZfP zu untersuchen.

Zur Untersuchung eines Bauwerks vor Ort wurde die Fuldataalbrücke Eichenzell gewählt, die im Zuge des Ausbaus der Bundesstraße zur Autobahn A 66 abzureißen war. Mit Unterstützung der Hessischen Straßenbauverwaltung und hierbei speziell des ASV Fulda wurden Untersuchungen mit Radar, Impact-Echo und Ultraschall an der Fahrbahnplatte von oben bzw. von unten sowie an der Innenseite des Hohlkastensteges durchgeführt.

Der Baustellenscanner und die einzelnen Verfahren konnten praxisnah erprobt und ihre Eignung nachgewiesen werden. Ein großer Vorteil der automatisierten Untersuchung eines Bauwerkes mit verschiedenen Verfahren liegt darin, dass die Messung bei den einzelnen Verfahren auf den gleichen Messpunkten erfolgt und somit eine Datenüberlagerung möglich ist. Mit Hilfe spezieller Auswertebzw. Überlagerungssoftware konnte eine Datenfu-

sion erreicht werden, die die Vorteile der einzelnen Verfahren zur besseren Untersuchung des Bauwerkes nutzen konnte.

Scanning-based methods for the non-destructive inspection of bridge constructions

The structures on the federal trunk roads (bridges, tunnels, noise protection walls) have to be inspected regularly in accordance with DIN 1076. In the course of the main inspection, which takes place each six years, these structures have to be inspected from close-at-hand, and the damage has to be assessed with regard to stability, traffic safety and durability.

However, it is not always possible to detect hidden damage or causes of visible damage. For this reason efforts have been increased in recent years in the field of non-destructive-testing procedures (zerstörungsfreie Prüfverfahren – ZfP) for structures. Radar, impact-echo and ultrasonic have proved to be fundamentally fit for use to detect and assess damage. However, the individual procedures have limits to their range of use or other conditions which must be taken into account. The use of these procedures to investigate larger areas is also very time-consuming, requires large numbers of staff and in some cases results in not inconsiderable costs. For this reason the Federal Institute for Materials Research and Testing (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) has developed a work-site scanner which enables an automated inspection of a large area of a structure to be carried out using the above-named NDT procedures.

The Fuldataal bridge of Eichenzell was selected for the purposes of investigating a structure in situ; this bridge was to be pulled down during development work to turn the federal road into an federal highway. With the support of the Hessian road construction authority and in particular ASV Fulda, investigations were carried out using radar, impact-echo and ultrasonic on the roadway plate from above and from underneath and on the interior side of the box girder.

The work-site scanner and the various procedures worked flawlessly. One great advantage of the automated investigation of a structure using

different methods is that the reading for each method is carried out on the same points which enables the data to be superimposed. With the help of special software to evaluate and superimpose the data, it was possible to achieve a fusion of the data which was able to utilise the advantages of the individual procedures to produce a better inspection of the civil engineering structures.

Inhalt

1	Einleitung	7	3.4.1.2	Ultraschall-Echo	37
1.1	Problemstellung und Zielsetzung	7	3.5	Zusammenfassung der ZfPBau-	
1.2	Informationsbereitstellung	7		Ergebnisse	37
2	Scannende Verfahren der ZfP	8	3.6	Zerstörende Untersuchungen	38
2.1	Literatursichtung	8	3.6.1	Ergebnisse der zerstörenden	
2.1.1	Thermografie	8		Untersuchungen	41
2.1.2	Potenzialfeldverfahren	8	3.7	Verifizierung der ZfPBau-	
2.1.3	Georadar	9		Ergebnisse	44
2.1.4	Tunnelscanner	10	3.7.1	Bestimmung der Bauteildicke	44
2.1.5	Shearografie	10	3.7.2	Ortung der schlaffen Bewehrung	47
2.1.6	Computer-Tomografie	11	3.7.3	Ortung der Spannkanäle	52
2.2	Anwendung in der Praxis	12	3.7.4	Zustandsbeschreibung der	
3	Untersuchungsbauwerk	12		Spannkanäle – Diskussion der Impact-	
3.1	Brückenbauwerk A 66/Eichenzell	12		Echo- und der Ultraschall-Echo-	
3.2	Beschreibung der großflächig			Ergebnisse	59
	angewandten ZfPBau-Verfahren	14	3.8	Zusammenfassung der	
3.2.1	Automatisierte Messwerter-			Ergebnisse	63
	fassung	14	4	Schlussfolgerungen	66
3.2.2	Methoden zur Auswertung der		5	Literatur	67
	ZfPBau-Messdaten und Darstellung				
	der Messergebnisse	20			
3.2.3	Datenfusion	23			
3.3	Ergebnisse der zerstörungsfreien				
	Untersuchungen an der Fahrbahn-				
	platte	23			
3.3.1	Messfelder auf der Fahrbahn-				
	platte (FBP)	24			
3.3.1.1	Radar	24			
3.3.1.2	Impact-Echo	26			
3.3.1.3	Ultraschall-Echo	27			
3.3.2	Messfelder an der Hohlkasten-				
	decke (HKD)	28			
3.3.2.1	Radar	29			
3.3.2.2	Impact-Echo	30			
3.3.2.3	Ultraschall-Echo	32			
3.4	Ergebnisse der zerstörungsfreien				
	Untersuchungen am Hohlkasten-				
	steg	33			
3.4.1	Messfelder am Hohlkastensteg				
	(HKS)	34			
3.4.1.1	Radar	34			

Aufstellung der Kapitelbearbeiter

Kapitel 1, 2 und 4:

Dipl.-Ing. Ralph Holst

Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat B4
„Grundsatzfragen der Bauwerkserhaltung“

Kapitel 3:

Dipl.-Ing. Doreen Streicher, Dipl.-Geol. André Gardei, Dipl.-Ing. Christoph Kohl, Dipl.-Ing. Jens Wöstmann, Dr. Herbert Wiggenhauser

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung,
Fachgruppe IV.4 „Zerstörungsfreie Schadensdiag-
nose und Umweltmessverfahren“

Kapitel 5:

Dipl.-Ing. Doreen Streicher, Dipl.-Geol. André Gardei, Dipl.-Ing. Christoph Kohl, Dipl.-Ing. Jens Wöstmann, Dr. Herbert Wiggenhauser;

Dipl.-Ing. Ralph Holst

Vorgang

Mit Schreiben der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) vom 07.11.2003 (AZ Z5t-fn 86.0028/-2003/AP) wurde die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) beauftragt, an dem Brückenbauwerk A 66/Eichenzell unmittelbar vor dessen Rückbau Untersuchungen mit zerstörungsfreien Prüfverfahren des Bauwesens (ZfPBau-Verfahren) durchzuführen. Im Mittelpunkt des Forschungsvorhabens „Scannende Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken“ stand dabei die technische Realisierung großflächiger Messungen mit den ZfPBau-Verfahren.

Im Auftragschreiben der BASt wird Bezug auf das Schreiben der BAM vom 16.09.2003 und das Angebot der BAM, Fachgruppe IV.4 „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“, vom 17.09.2003 genommen.

Das Angebot beinhaltet automatisierte Messungen mit Radar, Impact-Echo und Ultraschall-Echo zur Ortung von Spanngliedern sowie eventuell vorhandener unverpresster Hüllrohrbereiche und Verdichtungsmängel. Des Weiteren waren zerstörende Prüfungen zur Verifizierung der ZfPBau-Untersuchungen vorgesehen.

Das Forschungsvorhaben wird durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS), vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), mitfinanziert.

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Zielsetzung

Das Bundesfernstraßennetz umfaßt 36.971 Brücken mit einer Brückenfläche von 27,2 km² (Stand 31.12.2003), 193 Tunnel und eine große Anzahl weiterer Ingenieurbauwerke wie Verkehrszeichenbrücken, Lärmschutzeinrichtungen und Stützwände. Die dafür aufzustellenden Erhaltungsprogramme erfordern nicht nur erhebliche Geldmittel, sondern beeinflussen auch Wirtschaft und Gesellschaft insgesamt. Neben den ständig wachsenden Verkehrsbeanspruchungen, insbesondere im Schwerverkehr, durch zunehmende Anzahl, Auslastung und zulässige Gewichte der Fahrzeuge, erfordert die ungünstiger werdende Altersstruktur und der geforderte wirtschaftliche Einsatz der zur Verfügung stehenden Haushaltsmittel, die Erhaltung der Bundesfernstraßen zu systematisieren, um auch zukünftig den Verkehrsteilnehmern eine ausreichende Qualität der Verkehrswege zu sichern. Zudem sind durch Optimierungen auf Bauwerks- und Netzebene die volkswirtschaftlichen Kosten (Nutzerkosten und Kosten Dritter) so gering wie möglich zu halten.

Zur Unterstützung realisiert das BMVBW ein umfassendes Management-System (Bauwerks-Management-System [BMS]) mit Teilmodulen für Bundes- und Länderverwaltungen, welches als Hilfsmittel für die Erstellung von Erhaltungsplanungen dient und als Controlling-Instrument die Realisierung von Zielen und Strategien ermöglicht. Angestrebt werden eine bundesweite Vereinheitlichung von Planungsverfahren sowie die Verbesserung der Wirtschaftlichkeit im Rahmen der Erhaltung des Bundesfernstraßennetzes.

1.2 Informationsbereitstellung

Auf Bundes- und Länderebene sind standardisierte Datenbanken auf der Basis der Anweisung Straßeninformationsbank (ASB) realisiert. Sie dienen u. a. zur Bereitstellung von Informationen für das BMS. Grundlage der Erhaltungsplanung auf Länderebene ist die Auswertung der Ergebnisse der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 [1]. Hierfür wurde in Verbindung mit der Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 (RI-EBW-PRÜF) [2] ein einheitliches Verfahren zur Schadensbewertung und Zu-

standsermittlung bereitgestellt und im Programmsystem SIB-Bauwerke implementiert.

Gemäß der DIN 1076 werden alle sechs Jahre Hauptprüfungen als handnahe Sichtprüfung durch Bauwerksprüfer durchgeführt. Dazwischen werden einfache Prüfungen durchgeführt. Können die dort erfassten Schäden nicht eindeutig gemäß RI-EBW-PRÜF bewertet werden, weil z. B. die Ursache oder das Ausmaß des Schadens nicht ersichtlich sind, so ist eine Objektbezogene Schadensanalyse (OSA) durchzuführen. Für die Durchführung einer OSA ist ein Leitfaden entwickelt worden [3]. Hierbei finden in zunehmendem Maße Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) Anwendung.

In den letzten Jahren haben die Verfahren der ZfP, speziell das Radar-, das Ultraschall-Echo- und das Impact-Echo-Verfahren, ihre prinzipielle Einsatzfähigkeit zum Auffinden von Bewehrungslagen, zur Feststellung von Bauteildicken einseitig zugänglicher Bauteile und zur Lokalisierung von Hohlstellen bewiesen. Jedoch ist der Einsatz dieser Verfahren zurzeit noch mit sehr hohem personellen Aufwand verbunden.

Aus diesem Grunde gibt es unter anderem bei der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Bestrebungen, die Verfahren der ZfP als scannende Verfahren einzusetzen. Dieses würde die Einsatzzeiten für die Prüfung erheblich reduzieren, eine wesentlich höhere Datendichte erzeugen und zudem die Möglichkeit eröffnen, mit Hilfe von spezieller Software die Ergebnisse verschiedener Verfahren zu kombinieren. Damit können die Vorteile der einzelnen Verfahren besser genutzt werden.

Es war daher sinnvoll, das vorliegende AP-Projekt durchzuführen, das aus zwei wichtigen Bestandteilen besteht:

- einer Literaturrecherche über scannende Verfahren im Bauwesen,
- Durchführung und Auswertungen von Messungen an einem realen Bauwerk.

Für den zweiten Punkt ist ein Auftrag an die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung erteilt worden (FE 86.0028/2003/AP), dessen Ergebnisse Teil dieses Berichtes sind [4].

2 Scannende Verfahren der ZfP

2.1 Literatursichtung

Die meisten Verfahren der ZfP sind Verfahren, die punktuell arbeiten, wie z. B. Impact-Echo und Ultraschall-Echo, d. h., es wird an einem Punkt ein Impuls erzeugt, der ebenfalls punktuell durch einen Messaufnehmer aufgenommen wird. Es gibt aber auch Verfahren, die schon seit Längerem flächenhaft eingesetzt werden. Diese Verfahren werden als scannende Verfahren bezeichnet. Vor allem in der Automobilindustrie und im Großflugzeugbau werden im Rahmen von Qualitätssicherungssystemen scannende Verfahren, eingebunden in den Produktionsablauf, eingesetzt. Die Produktionsabläufe in der stationären Industrie unterscheiden sich aber in sehr starkem Maße von denen der Bauindustrie und hierbei speziell beim Bau von Ingenieurbauwerken im Zuge von Straßen; denn bei Brücken und Tunneln handelt es sich fast immer um individuelle Bauwerke, die zwar nach einheitlichen Regeln erstellt werden, die sich aber in erheblichem Maße voneinander unterscheiden. Zudem findet der Herstellungsprozess nicht unter immer gleichen Bedingungen in einer Werkshalle statt, sondern die Bauwerke werden vor Ort erstellt. Das bedeutet aber eine sehr große Abhängigkeit von äußeren Einflüssen wie z. B. Temperatur, Niederschlägen, Baugrundverhältnissen und Jahreszeit.

Die Einflüsse aus Entwurf, Bauausführung und örtlichen Verhältnissen führen dazu, dass die Einsatzmöglichkeiten von zerstörungsfreien Prüfverfahren (ZfP) so flexibel sein müssen, dass sie sich den jeweiligen Gegebenheiten anpassen können. Dieses gilt im besonderen Maße für scannende Verfahren, die zu einem beträchtlichen Teil automatisiert ablaufen.

Aus diesen Gründen werden im Nachfolgenden die für den Baubereich bekanntesten scannenden Verfahren kurz vorgestellt und ihre Einsatzmöglichkeit im Rahmen der Bauwerksprüfung bzw. der objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) dargestellt.

Die Verfahren Radar, Impact-Echo und Ultraschall werden in Kapitel 3 im Zusammenhang mit den Messungen am Bauwerk in Eichenzell vorgestellt.

2.1.1 Thermografie

Bei der Anwendung des Verfahrens der transienten Thermografie bei Stahlbetonkonstruktionen wird ein instationärer Wärmezustand betrachtet, der

durch den natürlichen (passiv) oder künstlich erzeugten (aktiv) Wärmefluss im Bauteil entsteht. Ein künstlich erzeugter Wärmefluss kann durch Beheizen der Oberfläche mit einer Heizquelle (Energie durch Infrarotstrahlen) entstehen, ein natürlicher Wärmefluss liegt durch die wechselnden Tages- und Nachttemperaturen der Bauwerksumgebung vor.

Die in der Oberfläche zugeführte Energie dringt entsprechend der Wärmeleitung des Baustoffes in diesen ein. Besonders anschaulich lässt sich dieses Verfahren anhand eines Spannbetonbauteiles erklären.

Durch den gut in den Beton eingebundenen Bewehrungsstahl fließt die Wärme ungehindert ab, ebenso wie durch satt verpresste Spannglieder. Liegt jedoch im Bereich der Bewehrung oder innerhalb des Hüllrohres ein Hohlraum vor, so wird die Wärmeausbreitung behindert und somit der Wärmefluss verlangsamt. Folge dieser Behinderung der Wärmeausbreitung ist, dass die Wärme über den eingeschlossenen Luftraum nicht so schnell abfließen kann und somit über dem Spannglied ein Wärmestau entsteht, der sich auch an der Betonoberfläche durch höhere Temperaturen als die der Umgebung abzeichnet.

Der Wärmeabfluss von der Betonoberfläche wird durch Betrachten der Betonoberfläche mit einer Infrarot-Kamera sichtbar gemacht.

Die Einsetzbarkeit des Verfahrens hängt von der Tiefenlage der Bewehrung (schlaff oder vorgespannt) ab. Bei zu großer Tiefenlage des Objektes wirkt sich der gestörte Wärmefluss nicht mehr an der Betonoberfläche aus.

In vielen Industriezweigen wird die Thermografie bereits seit vielen Jahren erfolgreich zur Qualitätskontrolle metallischer und nichtmetallischer Schichtsysteme eingesetzt. Ziele sind hierbei die Ortung von Ablösungen von beschichteten Metalloberflächen oder von Ablösungen in Aluminium- und CFK-Laminaten.

2.1.2 Potenzialfeldverfahren

Potenzialmessungen zur Untersuchung des Korrosionszustandes der Bewehrung von Stahlbetonbauwerken wurden in den USA schon in den 60er Jahren angewendet.

In Europa erfolgte die Anwendung dieses zerstörungsfreien Prüfverfahrens in nennenswertem

Umfang erst ab der zweiten Hälfte der 80er Jahre, wobei die Schweiz hier eine Art Vorreiterrolle übernahm. In der Schweiz wurde im Jahre 1993 eine Richtlinie zur „Durchführung und Interpretation der Potenzialmessungen an Stahlbetonbauteilen“ eingeführt.

Zur Untersuchung des Korrosionszustandes der Bewehrung von Brückenbauwerken wurde dieses Verfahren in Deutschland bislang nur in Einzelfällen eingesetzt. Dies ist vor allem darauf zurückzuführen, dass die Ergebnisse dieses Verfahrens von sehr vielen Faktoren beeinflusst werden und eine zutreffende Beurteilung ohne eine Berücksichtigung aller wesentlichen Einflussgrößen nicht erfolgreich sein kann. Die Interpretation von Potenzialmessungen an Brückenbauwerken erfordert fachkundiges Personal, welches über umfangreiche Erfahrung im Umgang mit dem Messverfahren sowie über Detailkenntnisse zur Konstruktion und Erhaltung von Brückenbauwerken verfügt.

Die Potenzialmessung beruht grundsätzlich auf der Bestimmung der Spannungsdifferenz (Potentialdifferenz) zwischen einer Referenzelektrode als einer Halbzelle und der Bewehrung als zweiter Halbzelle. Als Referenzelektroden werden üblicherweise Kupfer/Kupfersulfat-Elektroden (CSE) verwendet, die sich durch einen geringen Temperaturkoeffizienten, der im Bereich von 0 bis 50 °C ca. 1 mV/°C beträgt, auszeichnen.

Bei der Potenzialmessung wird der Umstand ausgenutzt, dass sich das Korrosionspotential eines nichtkorrodierenden Bewehrungsstabes in dem alkalischen Beton von dem eines korrodierenden Bewehrungsstabes im Beton um bis zu mehrere Hundert mV unterscheidet. Das Messgerät der Potenzialmessung ist in Bild 1 dargestellt.

Für die Durchführung von Potenzialmessungen wird die Referenzelektrode über ein isoliertes Kupferkabel an die Bewehrung angeschlossen. Wichtig dabei ist, dass die Bewehrung des zu untersuchenden Bauwerks/Bauteils elektrisch leitend miteinander verbunden ist. Das Potenzial zwischen den beiden Halbzellen (Referenzelektrode und Bewehrung) wird durch ein Spannungsmessgerät, welches in der Regel mit einem Speicher zur Erfassung von Messpositionen und Messwerten verbunden ist, gemessen. Bei der Auswertung und Interpretation der Messungen ist zu berücksichtigen, dass das gemessene Potenzial verschiedenen Einflussgrößen unterliegt und damit in einem weiten Bereich variieren kann.

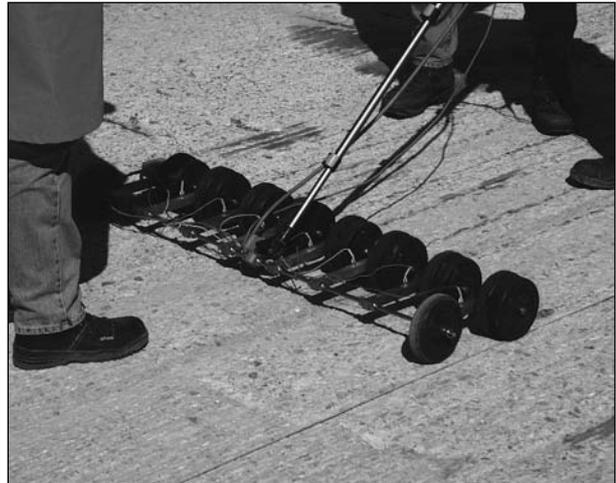


Bild 1: Potenzialfeldverfahren

2.1.3 Georadar

Das Georadar-Verfahren beruht auf der Aussendung elektromagnetischer Impulse in das zu untersuchende Medium. Je nach vorliegender Aufgabenstellung werden Mittenfrequenzen von 20 MHz bis zu ca. 2,5 GHz verwendet. Der eingeleitete Impuls bewegt sich im zu untersuchenden Medium entsprechend den materialspezifischen Eigenschaften, wobei die Wellengeschwindigkeit umgekehrt proportional zur Quadratwurzel der Dielektrizitätskonstanten ist.

Für die Erfassung von Bestandsdaten wurde das Georadar-Verfahren bereits mehrfach mit Erfolg eingesetzt. Das Ziel der Untersuchung liegt dabei z. B. in der zerstörungsfreien Erfassung des Aufbaus der oberen Schichten einer Straße. Auch in den USA wurde im Rahmen des SHRP-Programms ein schnellfahrendes Radarsystem zur Untersuchung von Brückenüberbauten entwickelt. Durch praktische Anwendung konnte gezeigt werden, dass eine Lokalisierung von Ablösezonen im Bereich der oberen und der unteren Bewehrung prinzipiell möglich ist.

Eine Übertragbarkeit dieser Ergebnisse ist jedoch aufgrund des in Deutschland im Vergleich mit dem in USA unterschiedlichen Belagsaufbaus nicht ohne weiteres möglich. Um weitere Erkenntnisse bezüglich der Leistungsfähigkeit und der künftigen Einsatzmöglichkeiten dieses Verfahrens für die Zustandsuntersuchung von Brückenüberbauten zu erhalten, wurde ein im Hinblick auf die Zustandsuntersuchung von Brückenüberbauten optimiertes Radarsystem zur vollflächigen Untersu-



Bild 2: Georadarverfahren

chung des westlichen Überbaus der Talbrücke Michelsrombach eingesetzt (Bild 2).

Dieses System wurde bereits mehrfach zur Zustandsuntersuchung von Brückenüberbauten eingesetzt. Auch der westliche Überbau der Talbrücke Michelsrombach wurde mit diesem Verfahren untersucht, wobei jedoch die Anzahl der Fahrstreifen und damit der Detaillierungsgrad der Messungen deutlich geringer als bei der hier beschriebenen Untersuchung waren.

Der Vorteil dieses Verfahrens ist, dass große Flächen in kurzer Zeit ohne wesentliche Beeinträchtigungen des Verkehrs untersucht werden können.

2.1.4 Tunnelscanner

In Bild 3 ist das Funktionsprinzip des Tunnelscanners schematisch dargestellt. Ein auf einer horizontalen Achse montierter Laser rotiert mit sehr hoher Geschwindigkeit, wobei die Oberflächenreflexionen gemessen werden. Auf diese Weise entstehen hochaufgelöste Bilder der Oberfläche der Tunnelinnenschale, die hinsichtlich Risse, Abplatzungen und sonstiger auf der Oberfläche sichtbaren Anomalien ausgewertet werden können. Zusätzlich zum sichtbaren Bild kann ein Infrarotbild aufgenommen werden, welches beim Vorhandensein eines ausreichenden Temperaturgradienten eine Interpretation hinsichtlich feuchter Stellen, Hohlstellen und Wasser in und hinter der Innenschale ermöglicht.

Die maximale Auflösung des Laser-Scanners beträgt 10.000 Punkte pro Scan (360°) für das sicht-

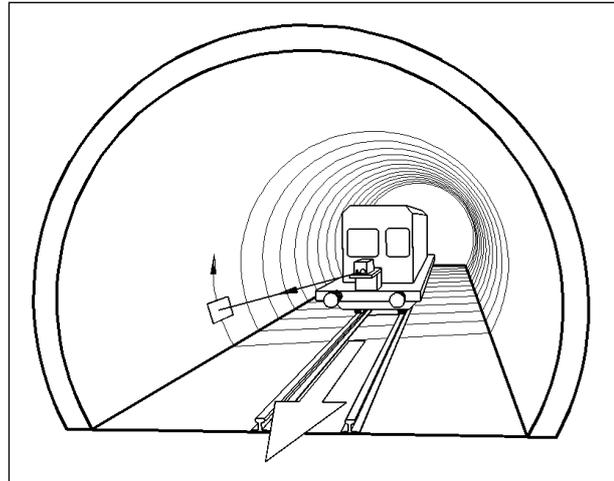


Bild 3: Funktionsprinzip Tunnelscanner

bare Bild und 2.500 Punkte pro Scan für die Infrarotaufnahme.

Für die erfolgreiche Durchführung der Infrarotaufnahme ist ein ausreichendes Temperaturgefälle zwischen Gebirge und Oberfläche der Innenschale des Tunnels erforderlich. Hierzu wird vor der Durchführung der Infrarotmessungen eine Messfühleranlage zur Feststellung der optimalen Messbedingungen installiert.

Die Vorteile des Tunnelscanners können wie folgt zusammengefasst werden:

- Keine bzw. nur geringe Beeinträchtigungen des Verkehrs.
- Maßstäbliche vollflächige Aufnahmen der Oberfläche der Innenschale sind in digitaler Form verfügbar.
- Synchroner Mehrkanalaufnahme (visuelles Bild plus Infrarotbild).
- Die Messungen sind reproduzierbar.
- Durch Wiederholungsmessungen können Informationen zur Zustands-/Schadensentwicklung gewonnen werden.

2.1.5 Shearografie

Die Shearografie ist ein Lasermessverfahren der interferometrischen Technik, welches die Änderungen von Materialverformungen unter mechanischer oder thermischer Belastung hochgenau erfasst. Es wird hauptsächlich im Fahrzeug- bzw. Flugzeugbau eingesetzt. Es lässt sich aber auch für Stahlbauteile von Brücken einsetzen.

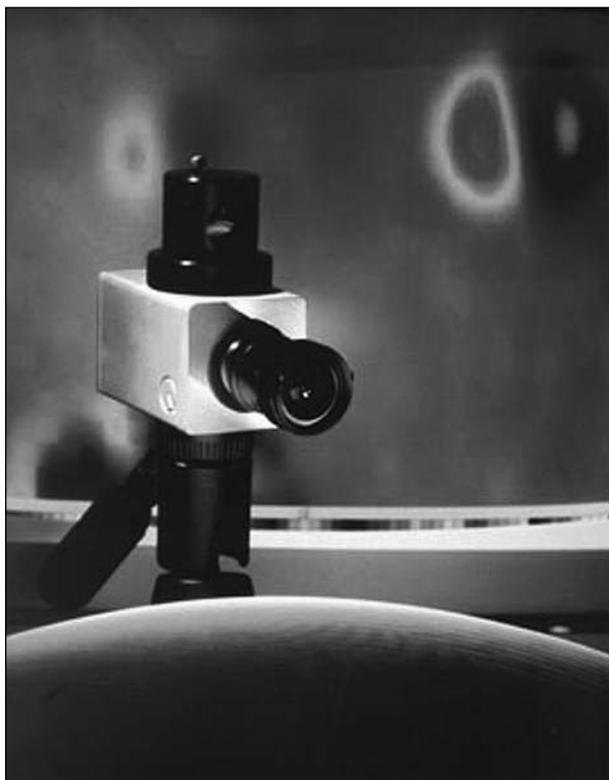


Bild 4: Shearingkamera

Das zu prüfende Objekt wird mit monomodigem Laserlicht divergent beleuchtet und das von der Oberfläche zurückgeworfene so genannte Speckle-Muster, welches die lokale mikrostrukturelle Lichtverteilung repräsentiert, wird von der Shearingkamera (Bild 4) detektiert. Über eine spezielle, in der Shearingkamera integrierte Optik wird jeweils ein Mess- und Referenzstrahl erzeugt, sodass durch Aufnahme des Objektes vor bzw. nach der Belastungsverformung ein interferometrisches Differenzbild des Objektzustandes entsteht. Die an die Shearingkamera angeschlossene Bilderfassung zeigt anschließend sofort in der Computerauswertung anhand eines farbkodierten Bildes die lokalen Deformationsgradienten bzw. Dehnungs-/Spannungskonzentrationen des Bauteils oder die Fehler im Werkstoffgefüge, z. B. Delaminationen, Lunker, fehlerhafte Reparaturbereiche, Aufprallbeschädigungen und andere Typen von Defekten.

Um das Material oder das Bauteil zu belasten, können verschiedene Belastungsmöglichkeiten verwendet werden, z. B. Vakuum, Druck, Wärme, Vibrationen, Dehnungs- oder Biegekräfte.

Die Vorteile des Verfahrens sind:

- ganzflächige Prüfung,
- berührungslos,

- unabhängig von der Oberflächenform und -qualität,
- zerstörungsfrei,
- hochempfindlich,
- einfacher, universeller und sehr flexibler Einsatz.

Das Verfahren ist sehr gut geeignet beim stationären Einsatz, z. B. bei der Vorfertigung von Stahlbauteilen in Werkshallen.

Die Aufnahmen können direkt vor Ort berechnet und ausgewertet werden. Die Wahl der für das Prüfproblem geeigneten Belastung bzw. Beanspruchung hat Auswirkungen auf die Apparatur und Auswertung. Möglich sind Prüfungen für statische und dynamische Objektbelastungen (thermisch, mechanisch, Vibration).

2.1.6 Computer-Tomografie

Bei tomografischen Verfahren wird eine räumliche Darstellung eines Untersuchungsvolumens aus der rechnerischen Auswertung einer großen Anzahl von Durchstrahlungsaufnahmen im Computer erzeugt. Dabei ist es im Prinzip egal, welche Strahlenquellen zur Durchleuchtung herangezogen werden.

Für das Bauwesen (Beton, Bewehrung, Feuchte usw.) werden die auch für die Radiografie üblichen Strahlungsquellen (Röntgenquellen, Linearbeschleuniger, nukleare Quellen) eingesetzt.

Zur Messung wird die interessierende Schnittebene des Bauteils aus möglichst vielen Winkeln durchstrahlt, die Absorption bestimmt und aus den gemessenen Absorptionsprofilen eine Schnittdarstellung berechnet. So ist eine Darstellung der Dichteunterschiede möglich. Sie stellt für die zerstörungsfreie Prüfung von Proben im Labormaßstab (bis ca. 1 m Durchmesser) ein gut entwickeltes Verfahren dar, das Dichteaufösungen von 1-3 % und Volumenaufösungen im Kubikmillimeterbereich und kleiner gestattet.

Bei Feldmessungen an Holzmasten können innere Fehlstellen in ihrer räumlichen Ausdehnung exakt bestimmt werden. Für Stahlfaserbeton lässt sich die Verteilung der Stahlfasern in gewählten Schnittebenen darstellen und der Fasergehalt und die Gleichmäßigkeit der Verteilung beurteilen. Das kann an Bohrkernen ebenso wie an anderen Probekörpern erfolgen.

Zum Einsatz des Verfahrens am Bauwerk selbst stellt sich das Problem, dass eine vollständige Durchstrahlung in alle Raumrichtungen aus geometrischen Gründen selten möglich ist. Somit müssen über die nicht gemessenen Richtungen Zusatzannahmen gemacht werden. Zur Berechnung der 2D- bzw. 3D-Verteilung aus einem eingeschränkten Winkelbereich, also unvollständigen Sätzen von Projektionen, steht das Verfahren der Tomosynthese zur Verfügung. Hier sind in den letzten Jahren bedeutende Fortschritte mit nichtlinearen Verfahren erzielt worden und auf der Basis von Durchstrahlungsmessungen mit einem Betatron für Betonkonstruktionen angewendet worden.

Das Verfahren kann aber nur für Bauteile bis zu einer gewissen Größe und zurzeit nur im Labor angewendet werden. Unter diesen Bedingungen kann das Verfahren zur Erkennung von Betonschäden, zur genauen Ortung der Bewehrung und zum Feuchtenachweis in Ziegeln eingesetzt werden, wenn es auf die genaue Ortung ankommt.

Tomografische Verfahren geben eine große Menge von Informationen, sind aber auch aufwändig in der Durchführung und kostenintensiv in der Anschaffung. Sie sind deshalb besonders dann zu empfehlen, wenn es auf eine möglichst umfassende Messung ankommt und Kosten dabei eine untergeordnete Rolle spielen.

Zudem gelten in Deutschland sehr strikte Vorschriften für den Einsatz radioaktiver Strahlen und diese erschweren somit den Einsatz solcher Verfahren.

Die Verteilung von Stahlfasern in Stahlfaserbeton an Bohrkernen oder Probekörpern zu bestimmen stellt eine interessante Möglichkeit bei der Baustoffentwicklung dar. Im Einzelfall ist dies auch als nachträgliche zerstörungssarme Untersuchung an dem Bauteil entnommenen Bohrkernen von Bedeutung.

2.2 Anwendung in der Praxis

Die vorgestellten spannenden Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung werden unterschiedlich häufig zur Untersuchung von Ingenieurbauwerken im Zuge von Bundesfernstraßen eingesetzt. So sind die Thermografie und die Shearografie sehr selten anzutreffen, wohingegen die Potenzialfeldmessung bei vermuteter Korrosion häufiger zum Einsatz kommt. Es ist zu erwarten, dass der Ein-

satz des Tunnelscanners in Zukunft aufgrund der voranschreitenden Verbesserung des Verfahrens im praktischen Einsatz und durch die stetige Zunahme der Tunnelbauwerke im Zuge der Bundesfernstraßen verstärkt stattfinden wird. Die Verfahren, die für die Zukunft die größte Einsatzhäufigkeit erwarten lassen, sind die Verfahren Impact-Echo, Ultraschall-Echo und Radar, die im nachfolgenden Teil näher behandelt werden.

3 Untersuchungsbauwerk

3.1 Brückenbauwerk A 66/Eichenzell

Die 480 m lange Fuldataalbrücke mit einzelligem Hohlkastenquerschnitt wurde 1966 errichtet. Sie stellt in Fortführung der B 40 den Anschluss an die A 7 her. Im Zuge des weiteren Ausbaus der A 66 (Bild 5) wurde das Bauwerk durch einen zweiten Überbau im Jahr 2001 komplettiert.

In Längsrichtung ist das Bauwerk ein über 11 Felder durchlaufender Träger mit Spannweiten von 10 x 42,0 m und 1 x 60,0 m. Der Überbau hat eine konstante Bauhöhe von 2,60 m (Bild 6). Die Breite der Bodenplatte beträgt 5,90 m, die der Fahrbahnplatte 13,90 m. Die beidseitigen Kragarme haben eine Spannweite von je 3,50 m.

Der abschnittsweise hergestellte Überbau mit Koppelfugen bei $l_K = 8,40$ m bzw. $l_K = 12,0$ m im letzten Feld ist in Längs- und Querrichtung beschränkt vorgespannt.

Als Spannverfahren wurde das System Züblin ZS mit rechteckigen Drähten N 120 (120 mm²) aus vergütetem Neptunstahl St 125/140 von Felten & Guilleaume, Köln, verwendet. In Längsrichtung wurde



Bild 5: BW A 66/Eichenzell

die parabolisch verlegte Vorspannung überwiegend durch Spannglieder des Typs ZS 111 (12 N 120, zul. Z = 111 t) gebildet. Die Zulagen in Feld 11 über der Stütze und im Feldbereich sowie die Quervorspannung bestehen aus Spanngliedern des Typs ZS 55,5 (6 N 120, zul. Z = 55,5 t). Die Spannglieder in Längsrichtung wurden in den Arbeitsfugen vollständig gekoppelt bzw. endverankert.

Durchgehende Spannglieder an den Koppelfugen gibt es somit nicht. Als Betongüte wurde für den Überbau ein B 450 (damalige Bezeichnung) eingebaut. Die schlaaffe Bewehrung besteht aus Beton-

stahl III a (KÖNIG, 2002). In einem Gutachten von KÖNIG, HEUNISCH und Partner (KÖNIG, 2002), wurden auf der Grundlage verschiedener Brückenuntersuchungen der Abbruch und Neubau der 1966 erbauten Brücke empfohlen. Im Gutachten werden u. a. Schädigungen des Fahrbahnplattenbetons und starke Korrosion der in der Platte eingebauten Bewehrung durch Frost-Tausalz-Angriff aufgeführt.

Durch chloridinduzierte Spannungskorrosion verursachte Drahtbrüche in zahlreichen der stichprobenartig untersuchten Querspannglieder werden

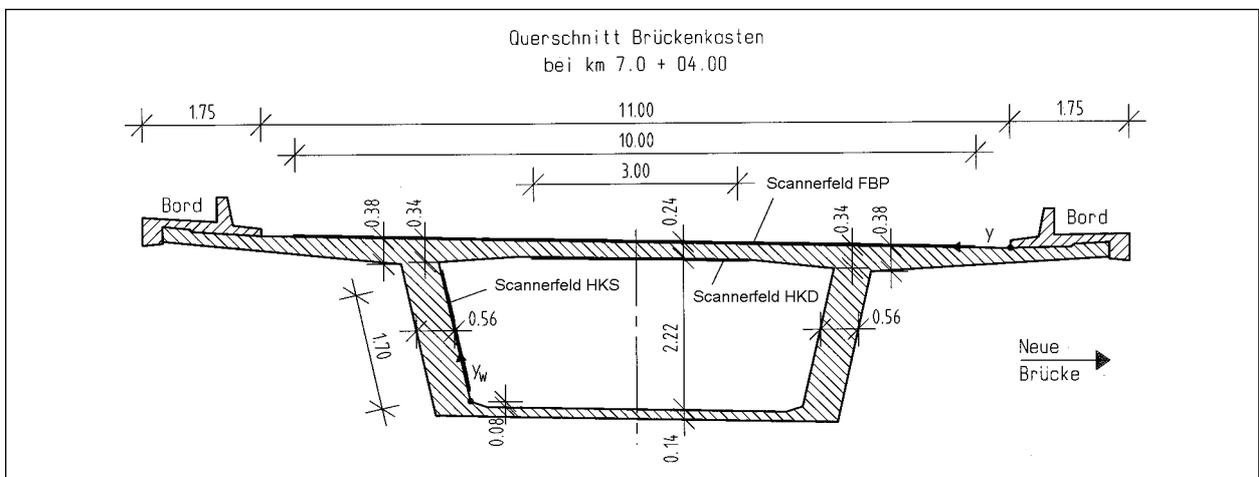


Bild 6: Querschnitt der Hohlkastenbrücke

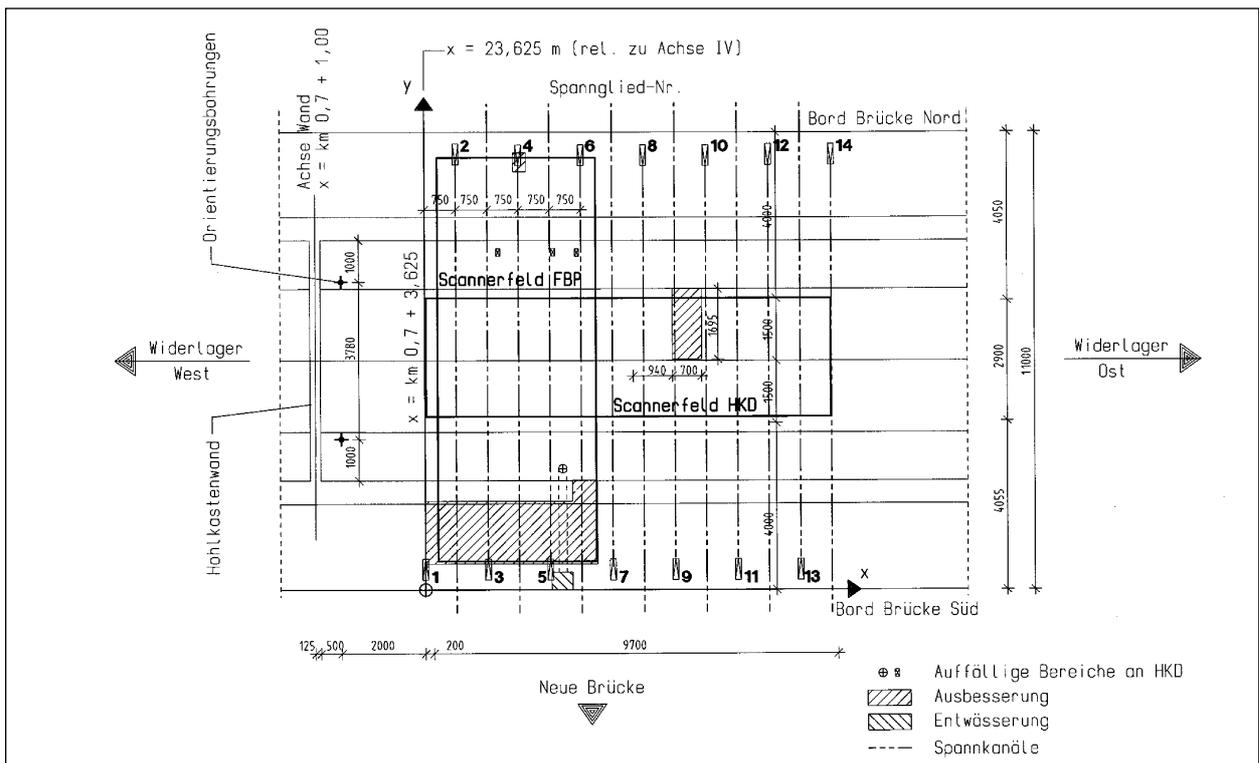


Bild 7: Messfelder auf der Fahrbahnplatte und an der Hohlkastendecke

ebenfalls als Schädigungen genannt. Der Abbruch und der Neubau sind inzwischen erfolgt.

Bei einer gemeinsamen Ortsbesichtigung von Vertretern der BAST und der BAM wurde festgestellt, dass sich sichtbare Schädigungen auf der Fahrbahnplatte auf den westlichen Bereich der Brücke konzentrieren.

Für die automatisierten Untersuchungen wurde daher zwischen den Achsen IV und V, d. h. zwischen 126 m bis 168 m vom Widerlager West entfernt, jeweils ein Messfeld auf der vom Fahrbelag befreiten Oberseite der Fahrbahnplatte, an der Hohlkastendecke und am Hohlkastensteg ausgewählt. In Längsrichtung befindet sich hier der Tiefpunkt der Brücke. Das Messfeld zur Untersuchung der Längsvorspannglieder wurde am nördlichen Steg vorgesehen. Die Lage der Messfelder im Querschnitt der Brücke ist in Bild 6 dargestellt.

Für die Untersuchung der Spannglieder in Querrichtung wurden die Messfelder auf der Fahrbahnplatte und an der Hohlkastendecke so gewählt, dass sie sich teilweise überlagern (Bild 7). Zur besseren Abstimmung der beiden Messfelder aufeinander wurden zwei Orientierungsbohrungen durch die Fahrbahnplatte ausgeführt.

3.2 Beschreibung der großflächig angewandten ZfPBau-Verfahren

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

- Radar,
- Impact-Echo,
- Ultraschall-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, Spannkanäle und größere Hohlstellen geortet werden können.

Die beiden akustischen Verfahren, Impact-Echo und Ultraschall-Echo, werden ebenfalls zur Dicken-

bestimmung und zur Ortung der Spannkanäle angewendet. Darüber hinaus sollen mit den Verfahren die Bauteile auf eventuelle Verdichtungsmängel im Betongefüge und vor allem auf gegebenenfalls vorhandene Verpressfehler in den Spannkanälen untersucht werden.

Durch Automatisierung der Messverfahren konnten in Eichenzell erstmalig große Messflächen mit allen drei Verfahren untersucht werden. Dazu wurden die Prüfsensoren auf Scanner installiert, die von der BAM, FG IV.4, speziell für flächige zerstörungsfreie Prüfungen im Bauwesen entwickelt wurden.

Im Folgenden ist die automatisierte Messwerterfassung mittels Scanner für die drei angewendeten ZfPBau-Verfahren erläutert. Die angewendeten Auswertemethoden werden im Kapitel 3.2.2 vorgestellt.

3.2.1 Automatisierte Messwerterfassung

Scanner

Bei den Messungen am Brückenbauwerk in Eichenzell wurden zwei Scanner unterschiedlicher Größe eingesetzt.

Die Scanner basieren auf Zahnrad/Zahnstangen bzw. -riemen-System. Der Vortrieb der einzelnen Achsen wird durch Schrittmotoren realisiert und garantiert ein schlupffreies Anfahren der einzelnen Messpunkte.

An die Messkopfhalter können unterschiedliche Sensoren montiert werden.

Somit sind berührungsfreie Radarmessungen über große Messflächen automatisiert durchführbar. Die Ankoppelung der Prüfköpfe an die Messoberfläche bei Impact-Echo und Ultraschall-Echo wird durch ein pneumatisches Andrucksystem erzielt, das den jeweils benötigten Anpressdruck durch eine manuelle Druckreglung gewährleistet.

Eine von der BAM, FG. IV.4, entwickelte Steuer- und Messwerterfassungssoftware ermöglicht einen automatisierten Messablauf. Mit dem Steuerprogramm werden die Positionierung der Sensoren, die Messabfolge und die Messdatenerfassung koordiniert. Die Software wurde so konzipiert, dass der gleichzeitige Betrieb der beiden akustischen Verfahren möglich ist. Die Abtastschritte können den Prüfaufgaben entsprechend individuell festgelegt werden.

An der Brücke in Eichenzell werden die Sensoren linienförmig parallel bzw. senkrecht zur Brückenachse geführt. Bei den Radarmessungen erfolgte die Abtastung zum Teil auch durch mäanderförmige Linienführung. Durch die auf diese Weise erzielte Reduzierung des Scannerverfahrweges konnte die Messzeit nochmals verkürzt werden.

Für die automatisierten Messungen auf der Fahrbahnplatte und an der Hohlkastendecke wurde der große Scanner eingesetzt (Bild 8). In einem Film, der der BAST in Form einer CD-ROM zur Verfügung gestellt wurde, ist die Arbeitsweise des Scanners während der Radarmessungen auf der Fahrbahn dokumentiert.

Mit der Entwicklung dieses Scanners wurde Mitte 2002 begonnen. Im Wesentlichen besteht er aus einer Scannerbrücke, die durch zwei synchronisierte Schrittmotoren auf zwei parallel verlaufenden Schienen verfahren wird. Die Schienen werden auf dem zu prüfenden Bauteil justiert und arretiert. Der Aufbau der Scannerbrücke ist in Bild 9 dargestellt. Sie besteht aus einem Balken, der auf zwei Böcken leicht montiert werden kann. Auf dem Balken befindet sich eine Laufkatze, die in Querrichtung beweglich ist.

Der Scanner ist so dimensioniert, dass Bauteilflächen über eine Breite von 4 Metern bis zu maximal 10 m Länge abgetastet werden können. Die Längenbeschränkung ergibt sich aus den Kabellängen für die Schrittmotoren.

Bauwerksabmessungen, wie im Inneren der Hohlkastenbrücke, erfordern die Anpassung des Scannersystems an die örtlichen Bedingungen.

Bild 8 rechts zeigt, wie der Scanner für die Messungen an der Hohlkastendecke mit einer Brückenbreite von 3 m aufgebaut wurde.

Durch Teilschienen mit einer Länge von 1,2 m bzw. 2,4 m kann das Schienen-Wagen-System modular aufgebaut werden. Der modulare Aufbau ermöglicht außerdem eine einfache Montage über Kopf. Wie beim stehenden Einsatz des Scanners werden zuerst die Führungsschienen montiert. Im Anschluss daran werden die Scannerböcke und danach der Balken, auf dem sich die Laufkatze mit dem pneumatischen Andrucksystem bereits befindet, eingehängt.

Aufgrund seiner robusten Bauweise arbeitete der Scanner bei unterschiedlichen klimatischen Bedingungen sehr zuverlässig; sowohl bei den Messun-



Bild 8: Scannerbetrieb; links: auf der Fahrbahnplatte, rechts: an der Hohlkastendecke

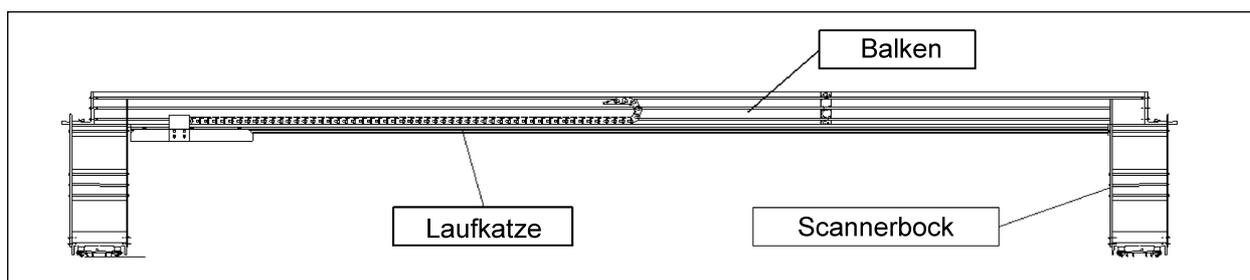


Bild 9: Scannerbrücke

gen im August, bei denen Tagestemperaturen von 24 °C-37 °C vorherrschten, als auch beim Messeinsatz im November bei Nachttemperaturen von bis zu minus 3 °C.

Für die Montage des Scanners inklusive Aufbau und Verkabelung der Messapparatur sind durchschnittlich 4 Stunden einzuplanen.

Der Einsatz des großen Scanners an senkrechten bzw. stark geneigten Flächen ist nicht möglich.

Aufgrund seines Aufbaus ist er auch für kleinere Untersuchungsflächen nicht geeignet.

Ein solcher Fall liegt bei den Messungen am 2,10 m hohen Hohlkastensteg vor. Hier wurde für die Ultraschall-Echo-Untersuchungen ein kleinerer BAM-Scanner eingesetzt, der bisher ausschließlich für Impact-Echo-Messungen zur Anwendung kam (Bild 10).

Er ist so dimensioniert, dass Messflächen von maximal 180 cm x 180 cm abgescannt werden können. Im Falle des Hohlkastensteges wurde der Scanner dreimal umgesetzt, um die beabsichtigte Messfläche vollflächig zu untersuchen.

Der kleinere Scanner besteht im Wesentlichen aus zwei über Schrittmotoren angetriebene Achsen, die



Bild 10: Scannerbetrieb am Hohlkastensteg

rechtwinklig zueinander stehen. Er zeichnet sich durch seine kleine Bauform und die schnelle Montagemöglichkeit aus. Für den Auf- und Abbau werden ca. 30 min benötigt. Das Umsetzen des Scanners beansprucht nur wenige Minuten.

Der kleinere Scanner kann auf ebenen und senkrechten Flächen betrieben werden. Für einen Überkopf-Einsatz ist er allerdings nicht konzipiert.

Radar

Beim Impulsradarverfahren wird die Antenne während der Messung über die Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils geführt und sendet dabei sehr kurze elektromagnetische Impulse (zeitliche Dauer eines Impulses < 1 ns) aus. Diese Impulse werden an der Oberfläche zum Teil reflektiert, der größere Anteil dringt jedoch in das Bauteil ein und wird dort an weiteren Grenzflächen, wie z. B. Hohlstellen oder metallischen Konstruktionselementen (z. B. Bewehrung), reflektiert. Der Reflexionsfaktor wird dabei durch den Unterschied der dielektrischen Eigenschaften der aneinander grenzenden Materialien bestimmt. Die reflektierten Signale werden von der Antenne empfangen und können im Hauptgerät verarbeitet bzw. auf dem Monitor simultan dargestellt werden. Aus der Laufzeit der reflektierten Impulse kann auf die Tiefe des Reflektors geschlossen werden. Die Funktionsweise des Radarverfahrens ist ausführlich in DANIELS, 1996, und DGZfP, 2001, beschrieben.

Für die Radaruntersuchungen am Brückenbauwerk Eichenzell wurde ein kommerzielles SIR-10-A-Radargerät der Fa. GSSI (USA) eingesetzt.

Das Impulsradargerät besteht im wesentlichen aus drei Einheiten: einem Hauptgerät mit Rechnermodul und Festplatte, einem Kontrollgerät mit Monitor sowie einem auswechselbaren Antennensystem, das über ein bis zu 30 m langes Kabel mit dem Hauptgerät verbunden werden kann.

Der Send- und Empfangsvorgang der elektromagnetischen Impulse wird mit Hilfe eines PC und zugehöriger Spezialsoftware gesteuert. Die Radarmessungen werden dabei über ein Triggersignal der Scannersteuerung gestartet und beendet. Die Messdaten werden auf Festplatte gespeichert. Eine anschließende Datenbearbeitung ist in den meisten Fällen notwendig.

Die Messungen auf der Fahrbahnplatte und an der Hohlkastendecke wurden mit dem Scannersystem

unter Verwendung der 1,5-GHz-Antenne durchgeführt (Bild 11).

Der Messaufbau des Radargerätes in Kombination mit dem großen Scanner ist in Bild 12 skizziert. Die in der Abbildung grau unterlegten Elemente bewegen sich auf der Scannerbrücke mit.

Mit Radar wurden die Messflächen entlang von Linien längs und quer zur Brückenachse abgerastert. Der Linienabstand betrug 5 cm. Die Antenne war am Scanner so montiert, dass sie sich ca. 1-4 cm über der Messoberfläche bewegte. Die Polarisationsrichtung des elektrischen Feldes verlief jeweils senkrecht zur Messrichtung.

Während der Datenaufnahme wurde die Antenne mit einer konstanten Geschwindigkeit von ca. 0,1 m/s gefahren.

Damit benötigt man für eine 10 m lange Messspur eine Messzeit von ca. 100 s. Die Datenerfassung des Radargerätes erfolgte mit einer Geschwindigkeit

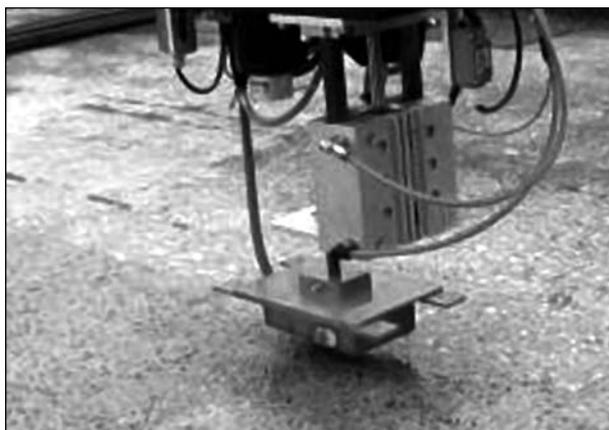


Bild 11: Radarmessung mit der 1,5-GHz-Antenne auf der Fahrbahnplatte mit dem Scannersystem

von 40 Messungen/s, sodass bei einer Messgeschwindigkeit von 0,1 m/s alle 2,5 mm eine Messkurve aufgezeichnet und gespeichert wurde.

Die Radarmessungen am Hohlkastensteg erfolgten durch manuelle Führung der Antenne direkt auf der Oberfläche. Mit der 1,5-GHz-Antenne wurden horizontale und vertikale Spuren mit einem Spurbstand von 10 cm aufgenommen.

Zusätzlich wurde eine 900-MHz-Antenne in vertikalen Linien über die Messfläche geführt. Die ausgesendeten elektromagnetischen Impulse der 900-MHz-Antenne dringen tiefer in das Bauteil ein, sodass auch Signale aus größeren Bauteiltiefen, z. B. von der Außenseite des Hohlkastenstegs, empfangen werden können. Beide Antennen waren jeweils senkrecht zur Fahrtrichtung polarisiert. Zur Triggerung der Messung und somit zur Wegaufnahme diente bei diesen Messungen ein an die Antennen montiertes Laufrad.

Impact-Echo

Beim Impact-Echo-Verfahren wird durch einen punktuellen mechanischen Stoß eine transiente Druckwelle erzeugt. Sie durchläuft das Bauteil und wird an internen Grenzflächen oder Diskontinuitäten wie Stahlbewehrung, Spannkanälen, Fehlstellen und Ablösungen reflektiert. Beim Auftreffen auf Luft, z. B. bei einer Hohlstelle oder an den äußeren Grenzflächen des untersuchten Bauteils, werden die Wellen nahezu vollständig reflektiert. Ein Sensor nimmt die Vielfachreflexionen auf (KRIEGER, 2002).

Die Betonoberfläche muss für die Untersuchungen möglichst glatt sein, damit eine gute Übertragung des mechanischen Stoßes und eine gute Ankoppe-

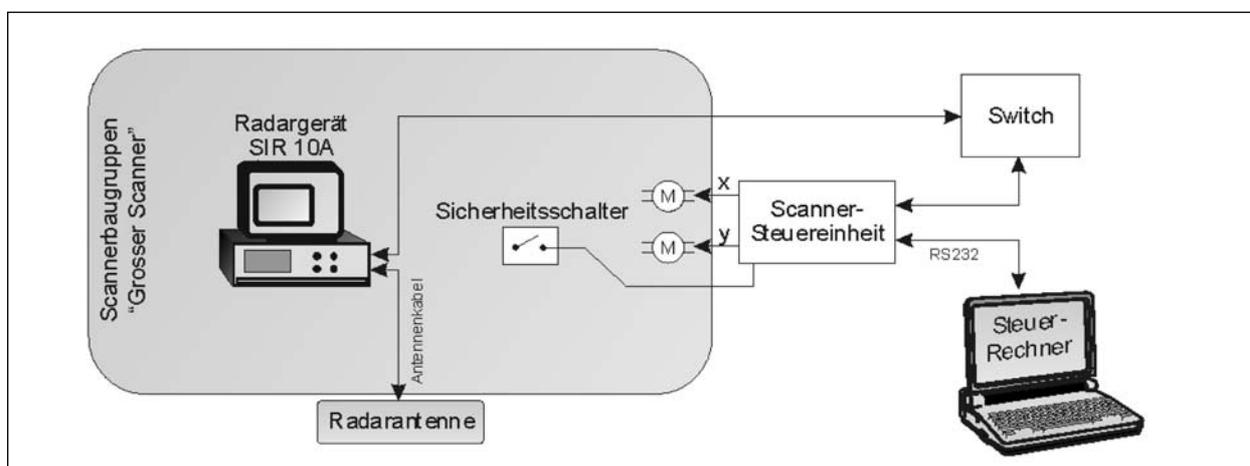


Bild 12: Messaufbau für den Betrieb des Radarverfahrens am großen Scanner (graues Feld: auf dem Scanner mitgeführte Elemente)

lung des Sensors gewährleistet sind. Beide Faktoren bestimmen maßgeblich das Nutz-Störsignalverhältnis und somit die Qualität der Messergebnisse.

In Eichenzell wurde ein modifiziertes kommerzielles Impact-Echo-Testsystem (Olson Instruments Inc, IE1, Bj. 1998) verwendet (Bild 13).

Die Anregung erfolgt über einen elektromagnetisch beschleunigten Stahlimpactor, der die Form einer Halbkugel mit 3 mm Durchmesser hat. Die Kontaktzeit des Stahlimpactors auf der Messoberfläche beträgt 0,067 ms. Frequenzen von 1 Hz bis

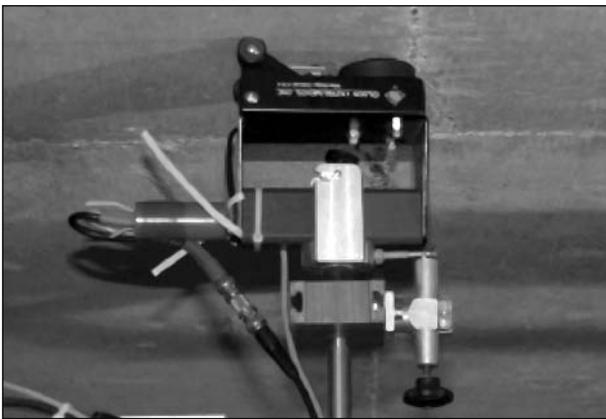


Bild 13: Impact-Echo-Messkopf von Olson Instruments

ca. 40 kHz werden angeregt. Bei einer Wellengeschwindigkeit in Beton von ca. $v = 4.000 \text{ m/s}$ sind somit Wellenlängen von minimal 10 cm zu erwarten.

Vom Stahlimpactor 4 cm entfernt befindet sich ein Beschleunigungssensor, mit dem die empfangenen akustischen Wellen in elektrische Signale umgewandelt, über einen Verstärker zur Erfassung durch eine Messwerterfassungskarte weitergeleitet und vom Messwerterfassungsprogramm digitalisiert werden. Von der Scannersteuersoftware werden die jeweiligen Ortskoordinaten an das Messwerterfassungsprogramm geliefert. Ein ortsaufgelöster Datensatz wird abgespeichert.

In Bild 14 ist der prinzipielle Aufbau für den gleichzeitigen Betrieb der beiden akustischen Verfahren am großen Scanner skizziert. Die in Bild 14 grau unterlegten Elemente befinden sich auf der Scannerbrücke und bewegen sich während der Messungen mit.

Bei den Impact-Echo-Messungen in Eichenzell wurden die Messwerte entlang von Linien quer bzw. längs zur Brückenachse aufgenommen. Der Linienabstand war gleich dem Abstand zwischen zwei Messpunkten auf einer Linie. An der Hohlkas-

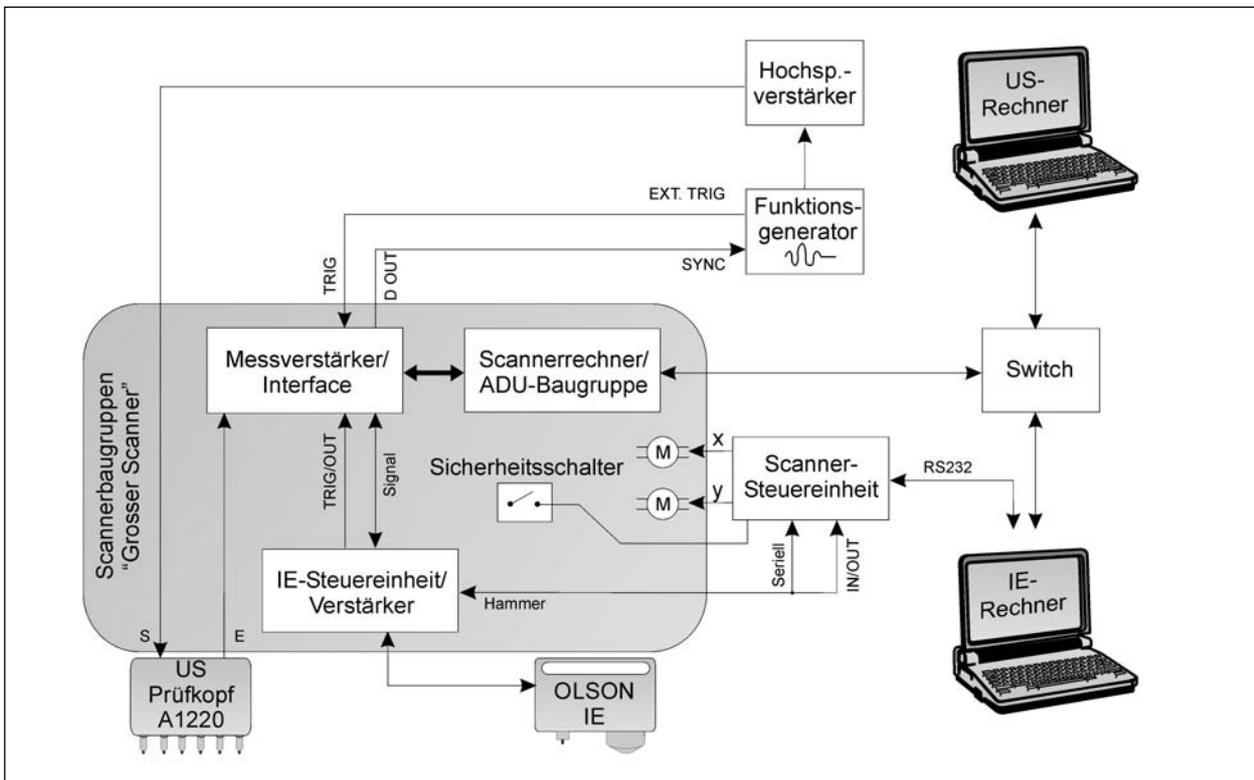


Bild 14: Messaufbau für den gleichzeitigen Betrieb von Impact-Echo und Ultraschall-Echo am großen Scanner (graues Feld: auf dem Scanner mitgeführte Elemente)

tendecke wurde mit einer Schrittweite von 5 cm und auf der Fahrbahnplatte mit einer Schrittweite von 4 cm gemessen.

Für die Impact-Echo-Messungen mit dem großen Scanner werden ca. 6 s pro Messpunkt benötigt. Für eine Messfläche von 1,00 m x 1,00 m resultiert bei einer Schrittweite von 5 cm eine Messzeit von ca. 45 Minuten.

Ultraschall-Echo

Beim Ultraschall-Echo-Verfahren wird ein Sendepuls mit einer definierten Mittenfrequenz (20-200 kHz) von einem programmierbaren Funktionsgenerator erzeugt und über einen Leistungsverstärker auf einen Ultraschall-Prüfkopf geschaltet. Der Sendeprüfkopf wandelt den elektrischen Sendepuls in einen mechanischen Schwingungsimpuls, der in das Bauteil eingebracht wird, um.

Die im Bauteil an Grenzflächen oder Diskontinuitäten, z. B. Spannkanälen, Hohlstellen und Rückwand des Bauteils, reflektierten Schwingungsimpulse werden am Empfangsprüfkopf empfangen und in einen Spannungsimpuls umgewandelt.

In Eichenzell wurde für die automatisierten Messungen am Bauwerk erstmalig ein Ultraschallarray mit 24 Punktkontaktprüfköpfen der Fa. ACSYS (Russland) (Acoustic Control Systems, 2001) als Sensor eingesetzt (Bild 15).

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 55 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 werden 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 ist.

Während der Messungen muss der Messkopf an die Messoberfläche angedrückt und ein möglichst konstanter Andruck aller 24 Prüfköpfe realisiert werden. Nach Angaben des Geräteherstellers darf die Rauigkeit der Messfläche bis zu 8 mm betragen (ACSYS, 2004).

Bei den automatisierten Ultraschall-Echo-Messungen wird auf Befehl eines Ultraschallrechners (Bild 14 bzw. Bild 16) der Sendepuls ausgelöst.

Die durch die Empfangsprüfköpfe umgewandelten Spannungsimpulse werden verstärkt und zur A/D-Umwandlung an die ADU-Baugruppe des Scannerrechners weitergeleitet.

Die Steuerung der Datenerfassung erfolgt durch den Scannerrechner. Auch die Messparameter, wie z. B. die Abtastfrequenz, werden in dem Befehlsstring zum Auslösen der Messung an die ADU-Baugruppe des Scannerrechners übergeben. Nach erfolgter Messung sendet der Scannerrechner eine Bestätigung der Parameter und das digitalisierte Ultraschall-Messsignal an den Ultraschallrechner zurück. Dort wird es angezeigt und gespeichert

Sowohl die Positionierung der Sensoren durch den Scanner und die Messablaufsteuerung als auch die Aufzeichnung der einzelnen Messkoordinaten er-

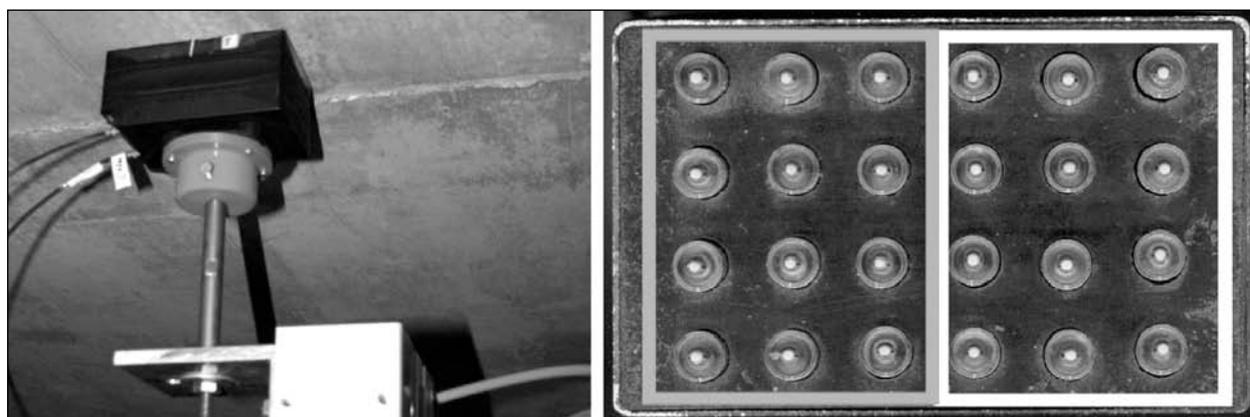


Bild 15: Links: Ultraschall-Sender/Empfänger-Array, rechts: Kontaktflächenansicht

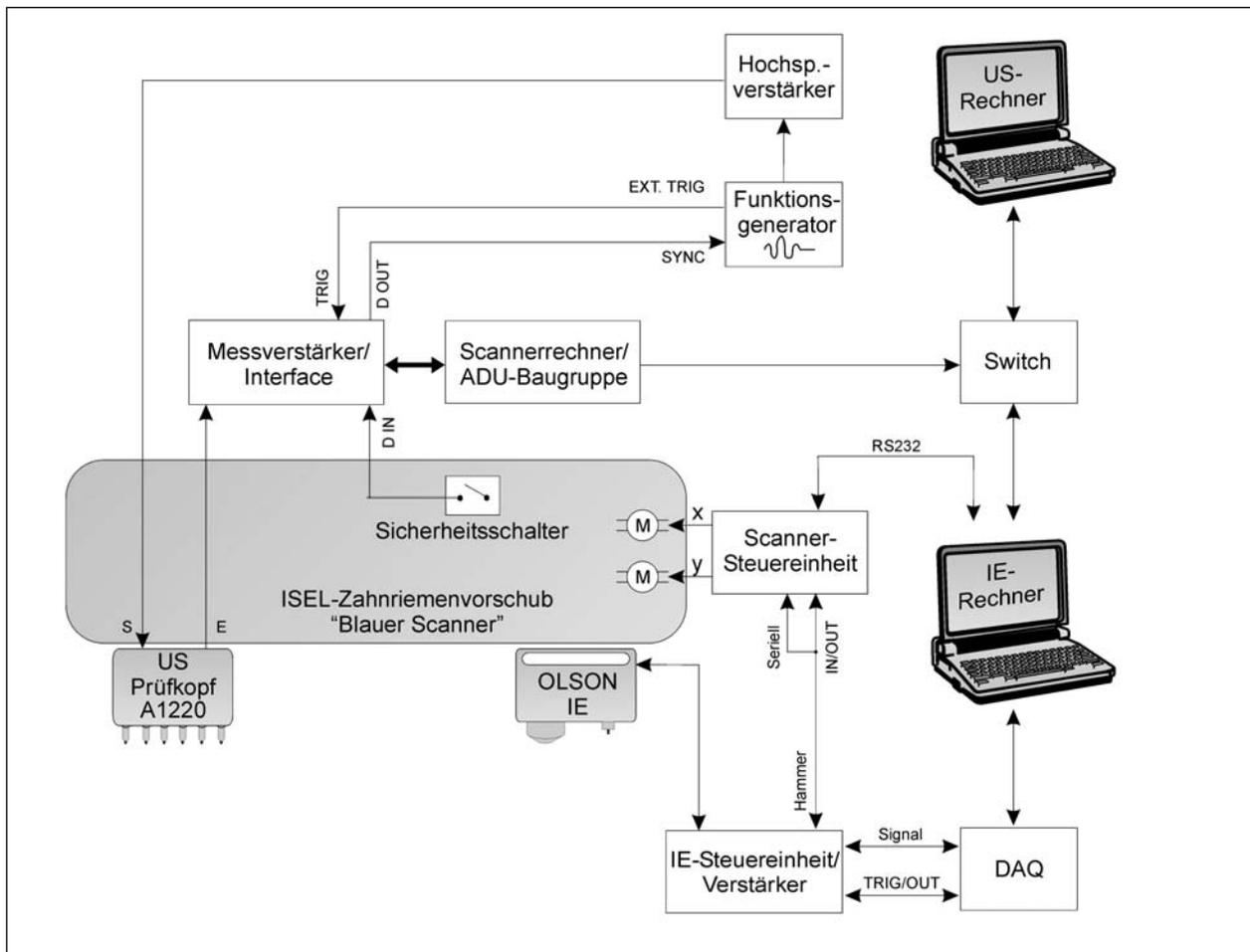


Bild 16: Messaufbau für den gleichzeitigen Betrieb von Impact-Echo und Ultraschall-Echo am kleinen Scanner (graues Feld: auf dem Scanner mitgeführte Elemente)

folgen durch das übergeordnete Scannerprogramm.

Die Messungen erfolgten durch linienförmiges Abtasten der Messfelder. Der Linienabstand war gleich dem Abstand zwischen zwei Messpunkten auf einer Linie. Um bei der späteren Auswertung SAFT-Rekonstruktionsberechnungen durchführen zu können, wurde in der Regel eine Schrittweite von 2,5 cm gewählt. Beim Messfeld „US2“ an der Hohlkastendecke betrug die Schrittweite 5 cm (Bild 28). Bei den Messungen mit Ultraschall-Echo wurden – wie mit Impact-Echo – ca. 6 s pro Messpunkt benötigt.

Der prinzipielle Aufbau für den Betrieb von Ultraschall-Echo am großen Scanner (Bild 14) ähnelt dem am kleinen Scanner (Bild 16). Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass bei den Messungen mit dem kleinen Scanner nur der Ultraschall-Messkopf auf dem Scanner mitgeführt wird.

3.2.2 Methoden zur Auswertung der ZfPBau-Messdaten und Darstellung der Messergebnisse

An jedem Messpunkt werden die empfangenen Signale, bei Radar die Intensität des elektromagnetischen Impulses, bei Impact-Echo und Ultraschall-Echo die Intensität des empfangenen Schalldruckes über die Zeit erfasst. Die Darstellung der Signale über die Zeit wird A-Bild genannt.

Allen drei in Eichenzell angewendeten ZfPBau-Verfahren ist gemeinsam, dass die Messwerte durch Einzelmessungen entlang von zahlreichen, parallel zueinander laufenden Linien aufgenommen wurden. Für die Auswertung stehen somit dreidimensionale Datensätze bei jedem ZfPBau-Verfahren zur Verfügung.

Für die Interpretation der Ergebnisse werden bei allen drei Verfahren Schnitte senkrecht zur Messoberfläche, so genannte B-Bilder, und Tiefenschnitte, auch als C-Bilder bezeichnet, herangezogen (Bild 17).

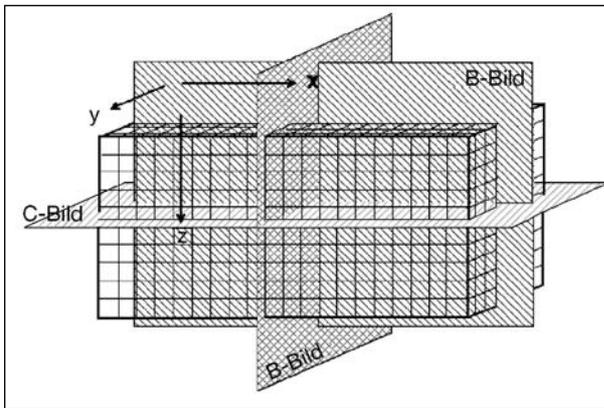


Bild 17: Darstellung der ZFP-Bau-Ergebnisse

Ein B-Bild setzt sich aus vielen A-Bildern entlang einer Messlinie zusammen. Die Intensitäten der Messsignale werden in Form von Grauwert- bzw. Falschfarben wiedergegeben. Gleichen Intensitäten werden hierbei gleiche Grauwerte bzw. Farben zugeordnet. 3D-Bearbeitungsprogramme ermöglichen es, Zeitscheiben bzw. Tiefenschnitte (C-Bilder) durch das Untersuchungsobjekt zu legen. In einem C-Bild werden dann die Intensitäten der empfangenen Signale in einer x-y-Ebene, parallel zur Messfläche, für eine definierte Messzeit bzw. Messtiefe z dargestellt.

Radar

Bei der Auswertung von Radarmessungen werden B-Bilder auch als Radargramm bezeichnet. Reflexionen an metallischen Einbauteilen, z. B. an Bewehrungsstäben, erscheinen aufgrund des Abstrahlwinkels der Antenne im Radargramm typischerweise als Hyperbeln. Die Entstehung einer solchen Hyperbel zeigt Bild 18.

Befindet sich die Antenne in Position I, also noch nicht direkt oberhalb des Reflektors, so wird aufgrund des Antennenöffnungswinkels bereits eine Reflexion detektiert, deren Laufzeit jedoch deutlich länger ist, als wenn sich die Antenne in Position III befindet. Mit Hilfe des Satzes von Pythagoras lässt sich zeigen, dass sich dann für verschiedene Antennenpositionen eine Hyperbel, auch als Defraktionskurve bezeichnet, im Radargramm ergibt. Aus dem Scheitelpunkt der Hyperbel lassen sich die laterale Position sowie bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Impulse im Baustoff die Tiefenlage des Objektes ermitteln.

Für die Darstellung von Tiefenschnitten wird die Laufzeitachse der A-Bilder unter Berücksichtigung der materialspezifischen und konstanten Dielektri-

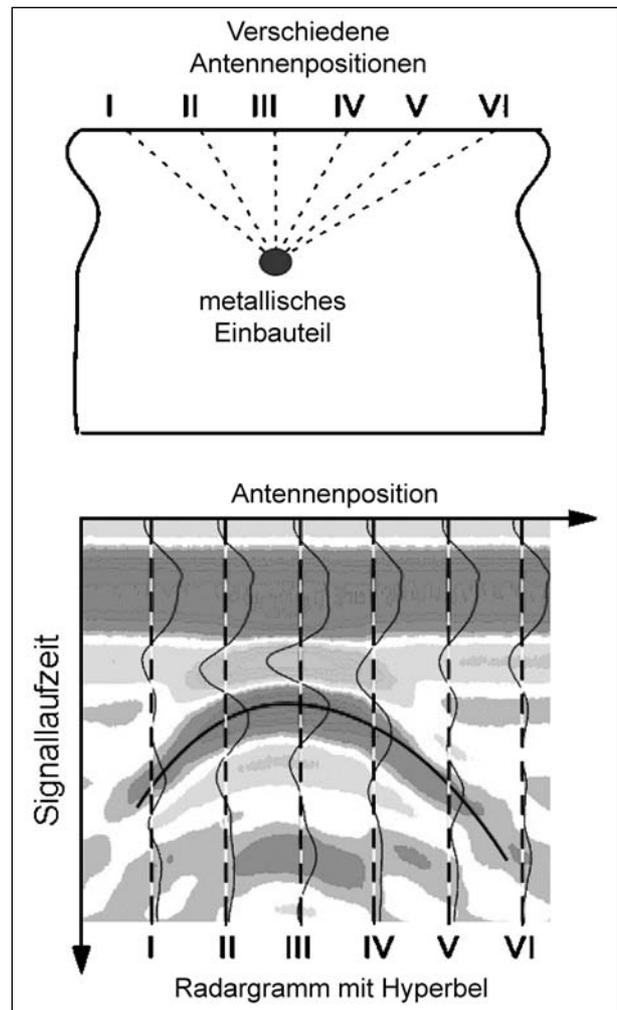


Bild 18: Hyperbel im Radargramm als Reflexionssignal eines metallischen Einbauteils

zitätszahl ϵ_r in eine Tiefenachse umgerechnet (Tiefenkalibrierung).

Der Öffnungswinkel der Radarantenne (in der Regel 45°) wird bei den zuvor beschriebenen Darstellungsformen der Rohdaten nicht berücksichtigt. Unter der Verwendung von Algorithmen basierend auf der Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT) kann dem Rechnung getragen werden.

Bei der BAM erfolgt die Rekonstruktion der Radardaten mit einem 3D-FT-SAFT-Programm, das an der Universität Kassel entwickelt wurde (MAYER, 1990). Die FT-SAFT-Rekonstruktion basiert auf dem Algorithmus der Stolt-Migration (STOLT, 1978). Die Defraktionskurven werden in ihrem Scheitelpunkt fokussiert.

Im Ergebnis der FT-SAFT-Rekonstruktion erscheinen Reflektoren dann nicht mehr als Hyperbeln, sondern entsprechen dem realen Reflektor (Bild 19). In Analogie zu den Radargramm-Tiefenschnitt-

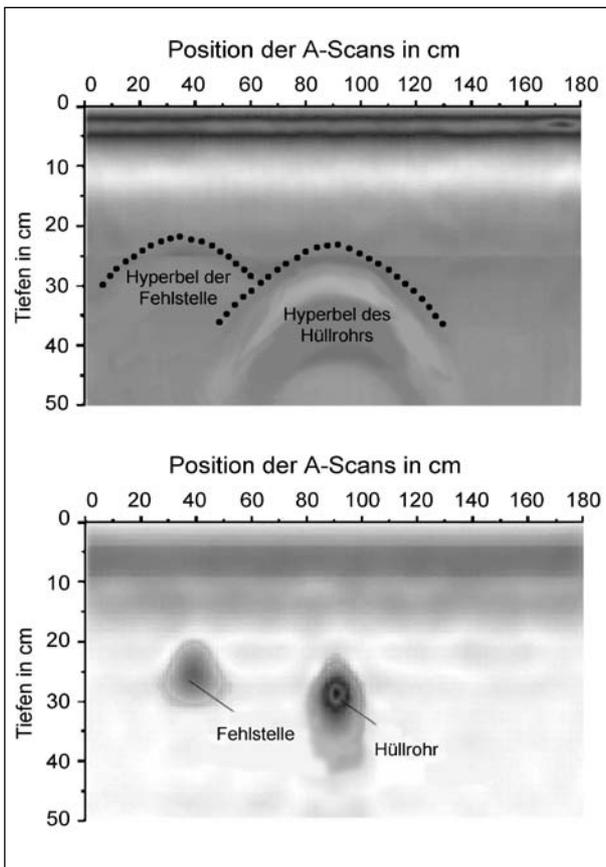


Bild 19: Exemplarische Darstellung der 3D-FT-SAFT-Rekonstruktion (Uni Kassel) am Beispiel eines Radardatensatzes; oben: B-Bild-Rohdaten, unten: B-Bild aus dem SAFT-rekonstruierten Datensatz (KOHL, 2003)

Darstellungen erfolgt die Interpretation der Radarergebnisse anhand von SAFT-B- und SAFT-C-Bildern.

Impact-Echo

Die Interpretation der Impact-Echo-Daten erfolgt durch eine Analyse im Frequenzspektrum (KRIEGER, 2002). Es wird dabei von den vom Beschleunigungssensor über der Zeit (ca. 13 ms) aufgenommenen Signalen ein Frequenzspektrum (Darstellung der Amplitude über den Frequenzkomponenten) mit Hilfe einer Fouriertransformation erzeugt (Bild 20, links).

Ist die für das im Objekt vorherrschende material-spezifische Schallgeschwindigkeit v bekannt, kann die Tiefenlage d eines Reflektors über die Beziehung $d = v/(2f)$ aus der Frequenz f berechnet werden.

Ähnlich wie bei Radar können aus dreidimensionalen Datensätzen zweidimensionale Impact-Echo-gramme (B-Bilder) und Tiefenschnitte (C-Bilder) erzeugt und für die Auswertung herangezogen werden (Bild 20, rechts).

Die für die Impact-Echodaten zur Verfügung stehenden Bearbeitungsprogramme ermöglichen nicht nur die B-Bild-Darstellung entlang einer Messlinie, sondern auch die B-Bild-Darstellung senkrecht zu den Messlinien. Zusätzlich können

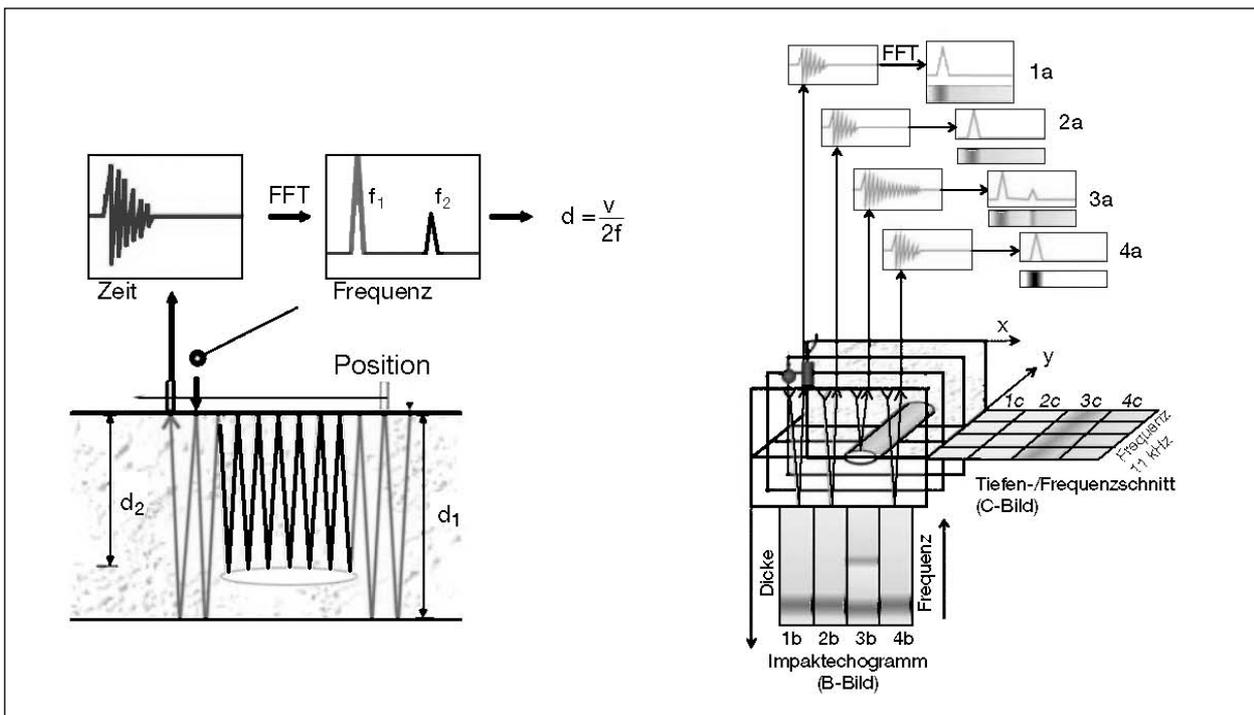


Bild 20: Links: Funktionsweise des Impact-Echo-Verfahrens, rechts: Datenvisualisierung von 1D-, 2D- und 3D-Datensätzen des Impact-Echo-Verfahrens

Aufaddierungen von B- bzw. C-Bildern vorher definierter Bereiche, so genannte B- bzw. C-Projektionen, erzeugt werden.

Ultraschall-Echo

Nach Bestimmung der materialspezifischen mittleren Schallgeschwindigkeit v können den Laufzeiten t entsprechende Messtiefen d durch die Beziehung $d = v \cdot t/2$ zugeordnet werden. Wie bei Radar und Impact-Echo lassen sich dann orts aufgelöste Abbilder des untersuchten Bauteils, B- und C-Bilder, erzeugen (Bild 17).

Zur Rekonstruktion der Daten wird eine am Fraunhofer Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) in Saarbrücken entwickelte dreidimensionale Version der Synthetischen Ultraschall-Fokussierungstechnik genutzt. Aus den Ultraschallsignalen, aufgenommen in einem zweidimensionalen Raster an der Oberfläche, erfolgt die Rückrechnung auf die dreidimensionale Reflektorverteilung im Prüfobjekt. Die Rekonstruktionsrechnung dieses Laufzeit-SAFT-Algorithmuses (SCHICKERT, 2003; SCHMITZ, 1999) stützt sich wahlweise auf eine monostatische bzw. multistatische Messtechnik, d. h., Ultraschallsender und -empfänger werden getrennt voneinander berücksichtigt (KRIEGER, 2002).

Zusätzlich wurden die in Eichenzell aufgenommenen Ultraschall-Echo-Daten erstmalig auch mit FT-SAFT-Programm (MAYER, 1990) rekonstruiert.

Bei beiden SAFT-Rekonstruktionen erhält man ein dreidimensionales Datenfeld der Streuer- und Reflektorverteilung im untersuchten Volumen. Die Interpretation der SAFT-Ergebnisse erfolgt anhand von SAFT-B/C-Bildern bzw. -Projektionen.

3.2.3 Datenfusion

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 Re-

ferenzsystem 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 Bewehrungsstähle oder auch Spannkanäle richtungsabhängig herauszufiltern. Nicht zuletzt können natürlich alle erwähnten Operationen beliebig miteinander kombiniert werden (GROS, 2001; KOHL, 2004).

3.3 Ergebnisse der zerstörungsfreien Untersuchungen an der Fahrbahnplatte

Gemäß dem Übersichtsplan zur Brücke Eichenzell weist die Fahrbahnplatte entlang der Brückenachse eine Dicke von ca. 24 cm auf. Sie nimmt zu den Stegen hin ca. 10 cm zu.

Die Spannkanäle wurden mit einem Achsabstand von 75 cm verlegt (Bild 7). Die Verankerung erfolgte wechselseitig. Die Ankerköpfe liegen im Bereich der Kragarme und sind 50 cm von den Kappen entfernt.

Die Tiefenlage der Spannkanäle war zum Zeitpunkt der Messungen nicht bekannt.

Verfahren	Fahrbahn FBP	Hohlkastendecke HKD
Radar	4,05 m x 9,80 m	2,85 m x 9,70 m
Impact-Echo	-	2,80 m x 5,31 m
Ultraschall-Echo	3,00 m x 4,50 m	US 1: 2,90 m x 3,87 m US 2: 2,90 m x 5,00 m

Tab. 1: Messflächen/Messeinsatz vom 11.08.03.-27.08.03

Verfahren	Fahrbahn FBP
Radar	3,80 m x 9,70 m
Impact-Echo und Ultraschall-Echo	4,08 m x 4,72 m

Tab. 2: Messflächen/Messeinsatz vom 10.11.03-14.11.03

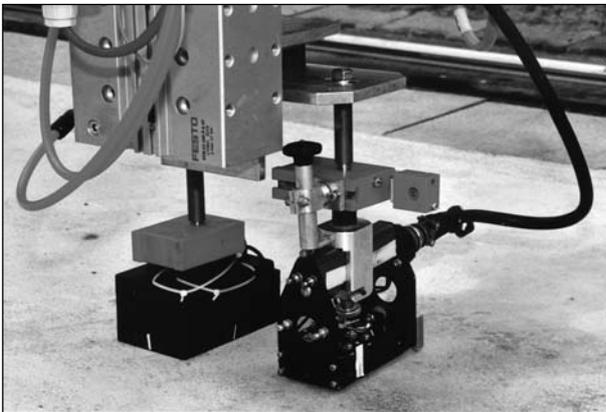


Bild 21: Messkopfhalter mit Impact-Echo und Ultraschall-Echo

Die Messungen zur Ortung und Zustandsuntersuchung der Quervorspannglieder wurden sowohl von der Unterseite als auch von der Oberseite der Fahrbahnplatte durchgeführt (Bild 7).

Mit Radar, Impact-Echo und Ultraschall-Echo erfolgten im August 2003 die ersten Scannermessungen. Die untersuchten Messflächen sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Bei diesem Messeinsatz kam das Impact-Echo-Verfahren aufgrund technischer Schwierigkeiten nur an der Hohlkastendecke zum Einsatz. Nach Beseitigung des technischen Defekts und der Prüfung durch Labortests wurden weitere Messungen auf der Fahrbahnplatte im November 2003 durchgeführt (Tabelle 2). Dabei kamen die beiden akustischen Verfahren gleichzeitig zur Anwendung. Die Anordnung der Sensoren am Scanner ist im Bild 21 dargestellt.

3.3.1 Messfelder auf der Fahrbahnplatte (FBP)

Der Fahrbahnbelag auf der Brücke war beim ersten Ortstermin bereits nicht mehr vorhanden. Der für

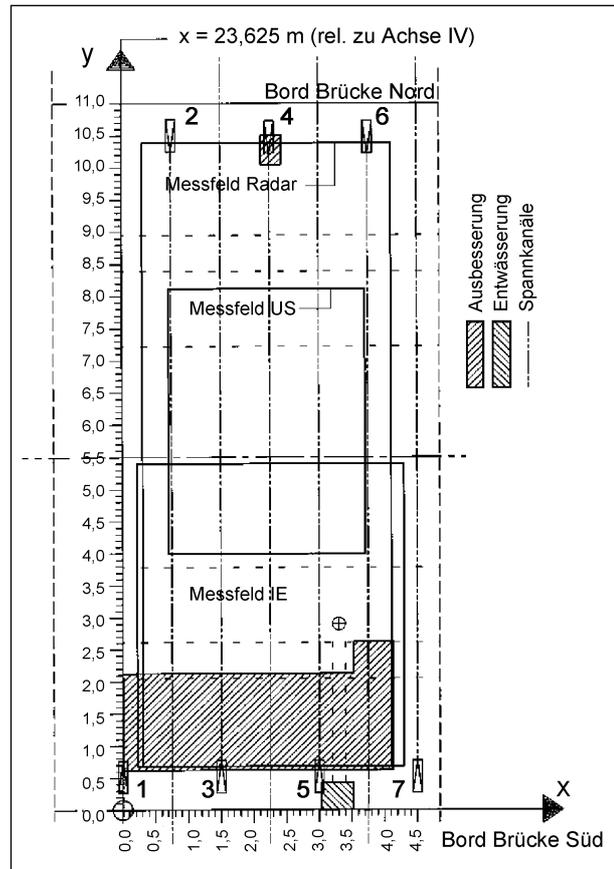


Bild 22: Messfelder von Radar, Impact-Echo und Ultraschall-Echo

die zerstörungsfreien Untersuchungen vorgesehene Bereich wurde dann unmittelbar vor den Messungen zusätzlich durch eine Fachfirma feingefräst und abgestrahlt.

Für die Messungen wurde der große Scanner mit der Scannerbrücke von 4 m eingesetzt (Bild 8).

In den folgenden Abschnitten werden die Ergebnisse zu den in der Skizze in Bild 22 gekennzeichneten Messflächen vorgestellt.

Für die Interpretation der ZfPBau-Ergebnisse wurden die Ergebnisse der bereits durchgeführten zerstörenden Prüfungen zunächst nicht berücksichtigt.

3.3.1.1 Radar

Die folgenden Darstellungen beruhen auf den Radardaten, die im November 2003 auf der Fahrbahnplatte mit der 1,5-GHz-Antenne aufgenommen wurden. Für die Auswertung wurde zunächst die an einer Querscheibe nahe dem Messfeld ermittelte Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 7,5$ berücksichtigt.

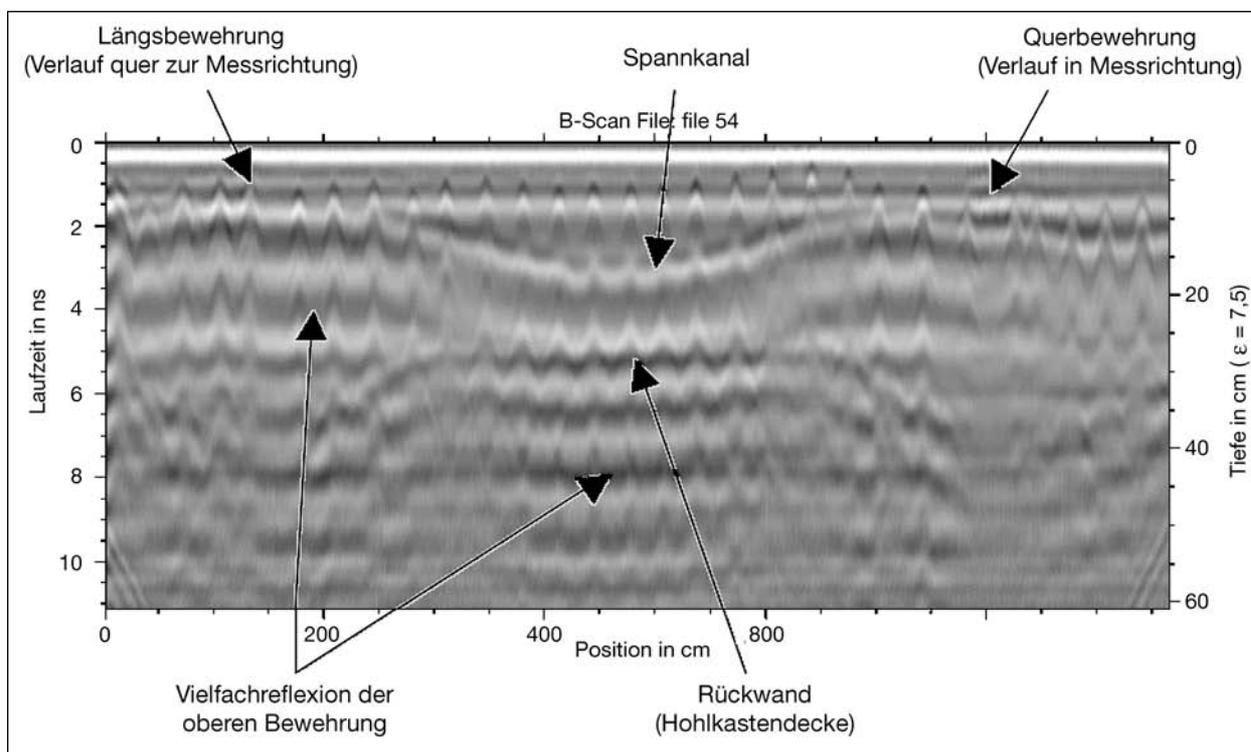


Bild 23: Radargramm der Messspur 54, aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne (Polarisation senkrecht zur Messrichtung) auf der Fahrbahnplatte entlang des Spannkanaals Nr. 3

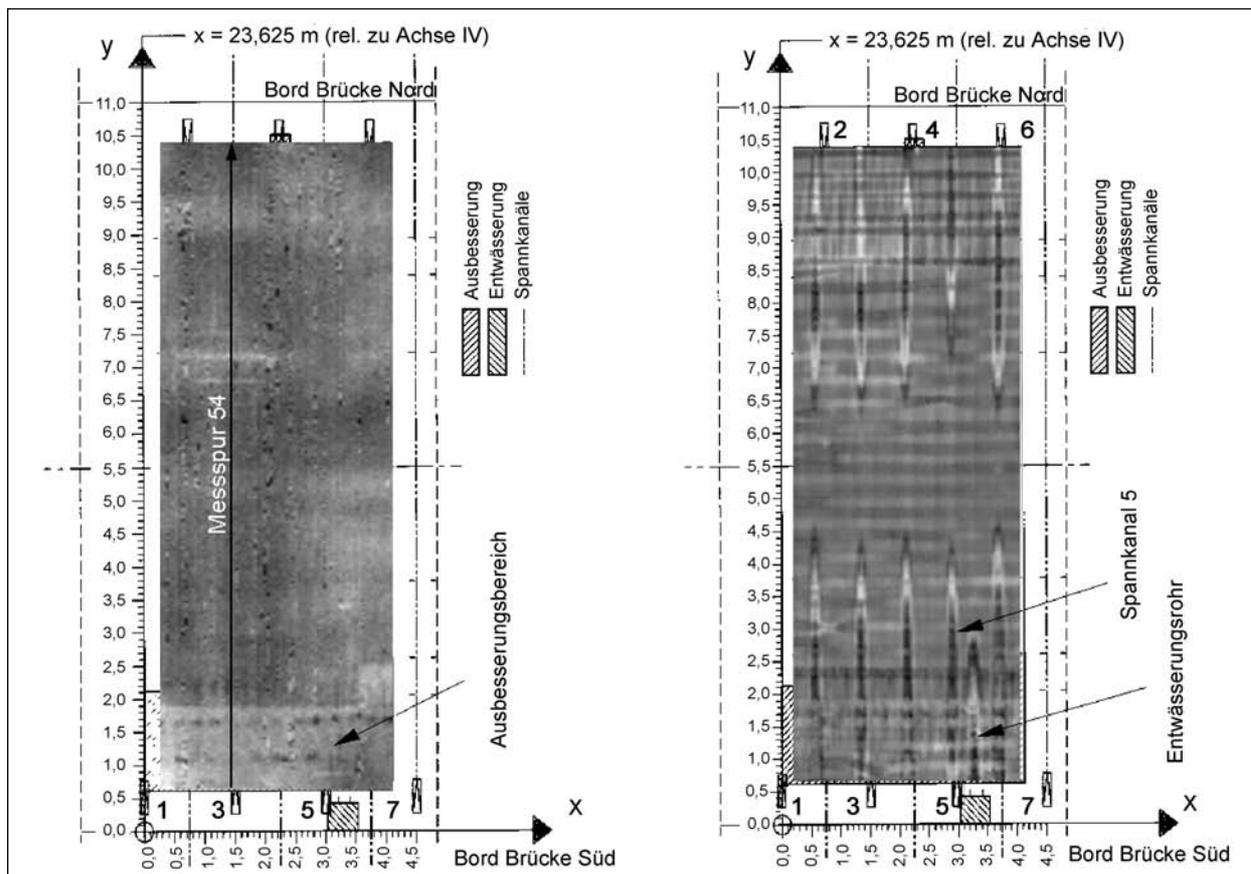


Bild 24: Radar: links – Tiefenschnitte in 1,7 cm und rechts – 12,8 cm Tiefe, Datensatz aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne mit senkrecht zur Messrichtung verlaufender Polarisationsrichtung auf der Fahrbahnplatte (77 parallele in y-Richtung verlaufende Messspuren, Spurlänge $l = 9,7$ m, Spurabstand = 5 cm)

Bild 23 zeigt das Radargramm der Messspur 54. Die Lage der entlang des Spannkanals Nr. 3 verlaufenden Messspur ist in Bild 24 gekennzeichnet.

Deutlich sichtbar sind im Radargramm die oberflächennahen Reflexionshyperbeln in einer Tiefe von ca. 5 cm. Sie werden durch die quer zur Messrichtung verlaufende Längsbewehrung verursacht.

Die Scheitelpunkte dieser horizontalen Hyperbelreihe geben dabei die laterale Position und Tiefenlage an. Der gleichmäßig über die gesamte Radargrammlänge horizontal verlaufende Reflexionshorizont in ca. 6 cm Tiefe wird durch die in Messrichtung verlaufende Querbewehrung verursacht. Daneben sind der parabolische Verlauf des Spannkanals und die Hohlkastendecke klar erkennbar.

In Bild 24 sind exemplarisch zwei Tiefenschnitte (C-Bilder) dargestellt. In einer Schnitttiefe von

1,7 cm (linkes Bild) ist deutlich am unteren Bildrand der Ausbesserungsbereich durch eine sich von der übrigen Fläche abhebenden Signalamplitude erkennbar. Schlaffe Bewehrung und Spannkanal sind erst in größeren Tiefen detektierbar.

Das rechte Bild der Abbildung (Schnitttiefe 12,8 cm) zeigt deutlich den Verlauf der sich in dieser Ebene befindenden Spannkanäle und im unteren Bildbereich zwischen den Spannkanälen Nr. 5 und Nr. 6 ein Entwässerungsrohr.

3.3.1.2 Impact-Echo

In Bild 25 liegen die Impact-Echo-Messungen von dem im November untersuchten Messfeld, in Bild 22 als „Messfeld IE“ gekennzeichnet, zu Grunde. Bei den Auswertungen der Datensätze wurde eine Longitudinalwellengeschwindigkeit von 4.170 m/s ermittelt.

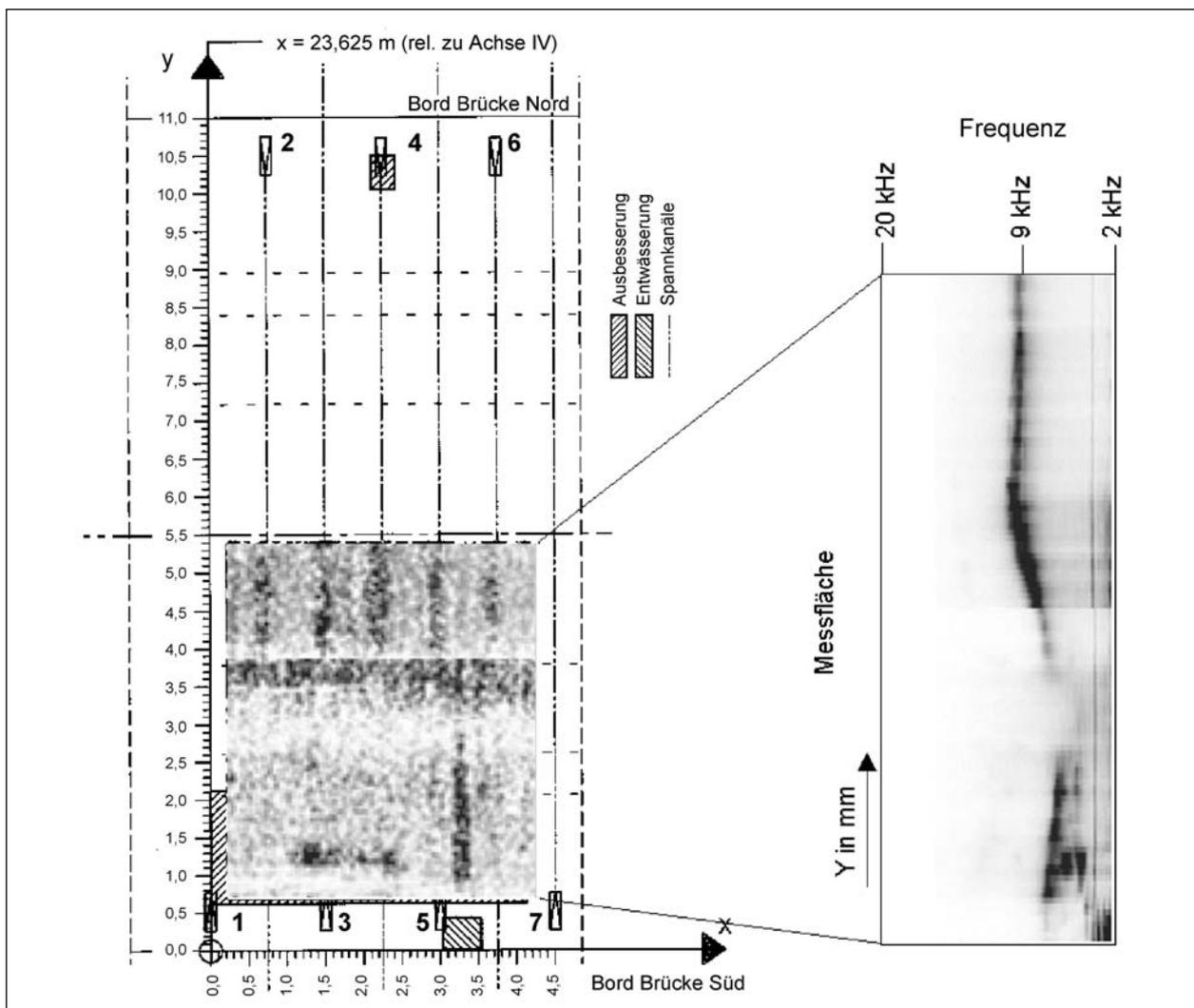


Bild 25: Impact-Echo: links – Messfläche mit C-Projektion im Bereich unmittelbar hinter der Rückwand, rechts – B-Projektion über die gesamte Messfeldbreite parallel zur y-Achse

In Bild 25 ist auf der linken Seite eine C-Projektion im Bereich unmittelbar hinter der Rückwand dargestellt. Deutlich bilden sich die Rückwandechos unterhalb der Spannkanäle ab $y = 4.000$ mm ab. Im Bereich zwischen den Spannkanälen Nr. 5 und Nr. 6 ist das verschobene Rückwandecho unter dem Entwässerungsrohr zu erkennen.

Direkte Reflexionen der Spannkanäle zeigen sich in den C-Bildern im Tiefenbereich der Spannglieder nicht. Die Verteilung der Spannglieder über der Messfläche ist daher nur durch die Verschiebungen der Rückwand unterhalb der Spannkanäle zu erkennen. In der B-Projektion parallel zur Brückenachse in Bild 26 wird dies nochmals deutlich. Angaben zur Tiefenlage der Spannkanäle sind somit nicht möglich.

In vielen Fällen werden die Art und Größe der Verschiebungen der Rückwandechos unterhalb von Spannkanälen zur Beurteilung des Verpresszustandes herangezogen, u. a. in SANSALONE, 1997. Im vorliegenden Fall lassen sich jedoch ohne zusätzliche Informationen keine Indikationen dazu ableiten.

In Bild 25 rechts ist eine B-Projektion, die einem vertikalen Schnitt durch die Fahrbahnplatte senkrecht zur Brückenachse entspricht, dargestellt.

Der Verlauf der Bauteilrückwand kann hier sehr gut als Rückwandecho von der Außenkante zur Bauteilmitte nachvollzogen werden.

Die Voutenausbildung und der sich anschließende gerade Verlauf der Rückwand in einer Messtiefe von ca. 23 cm sind gut zu erkennen.

Markante Auffälligkeiten an der Fahrbahnplatte, die z. B. auf ein anderes Betongefüge hindeuten, konnten nicht festgestellt werden.

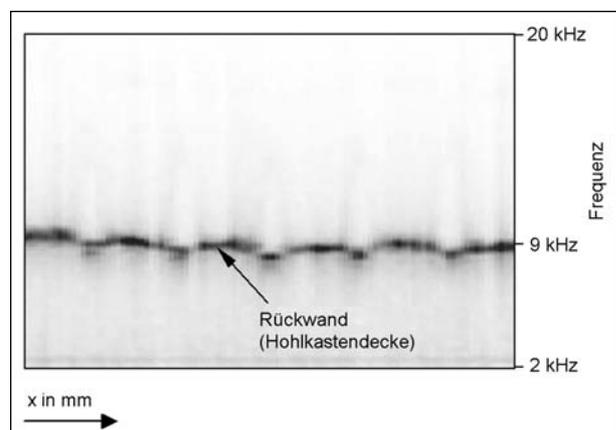


Bild 26: Impact-Echo: B-Projektion von $y = 3.800$ mm bis $y = 5.400$ mm – Verschiebungen der Rückwand unterhalb der Spannkanäle zu kleineren Frequenzen

Zu erkennen sind aber des Öfteren Amplitudenschwankungen für bestimmte Bereiche der Spannkanäle und für das Betongefüge des Bauteils, wie z. B. in den Bildern 25 und 26. Es wird angenommen, dass diese u. a. aus veränderten Ankopplungsbedingungen des Impact-Echo-Sensors an die Messoberfläche resultieren. Zur Klärung dieser Effekte wurden Bohrkern entnommen.

3.3.1.3 Ultraschall-Echo

Den folgenden Darstellungen liegen die Ultraschall-Echo-Messungen von dem im August untersuchten Messfeld, in Bild 22 als „Messfeld US“ gekennzeichnet, zu Grunde.

Eine Auswertung der Ultraschalldaten, deren Aufnahme gemeinsam mit den Impact-Echo-Daten im November erfolgten, war nicht zweckmäßig. Der Anteil der fehlerhaften Einzelmessungen war zu groß.

Bei den 3D-SAFT-Rekonstruktionsrechnungen wurde eine Transversalwellengeschwindigkeit von 2.500 m/s berücksichtigt. Sie wurde am Bauteil durch Einzelmessungen im Bereich der Orientierungsbohrungen (Bild 7) bestimmt.

In der in Bild 27 links dargestellten SAFT-C-Projektion über eine Messtiefe von 5 cm bis 15 cm zeichnen sich die Spannkanäle Nr. 3 bis Nr. 6 durch erhöhte Intensitäten ab. Die horizontale Lage der abgebildeten Spannkanäle entspricht den Angaben der zur Verfügung stehenden Bauunterlagen.

Sowohl in der SAFT-C-Projektion als auch bei der als Beispiel in Bild 27 dargestellten SAFT-B-Projektion über dem Spannkanal Nr. 3 erstreckt sich ein Bereich, in dem sich sowohl die Spannkanäle als auch die Rückwand in geringerer Intensität im Vergleich zum übrigen Messbereich abzeichnen.

Visuell konnten in diesem Bereich von der Fahrbahnmitte ($y = 5.500$ mm) bis ca. $y = 7.200$ mm keine markanten Änderungen an der Fahrbahnplatte, wie z. B. ein anderes Betongefüge, festgestellt werden. Das Erscheinungsbild ist möglicherweise auf einen geringeren Energieeintrag bzw. eine geringere Energieaufnahme bei den Messungen zurückzuführen.

Die höheren Intensitäten ab ca. $y = 7.200$ mm über die gesamte Messfeldbreite werden vermutlich durch die sich ändernden Geometrieverhältnisse im Übergangsbereich zur Voute herbeigeführt.

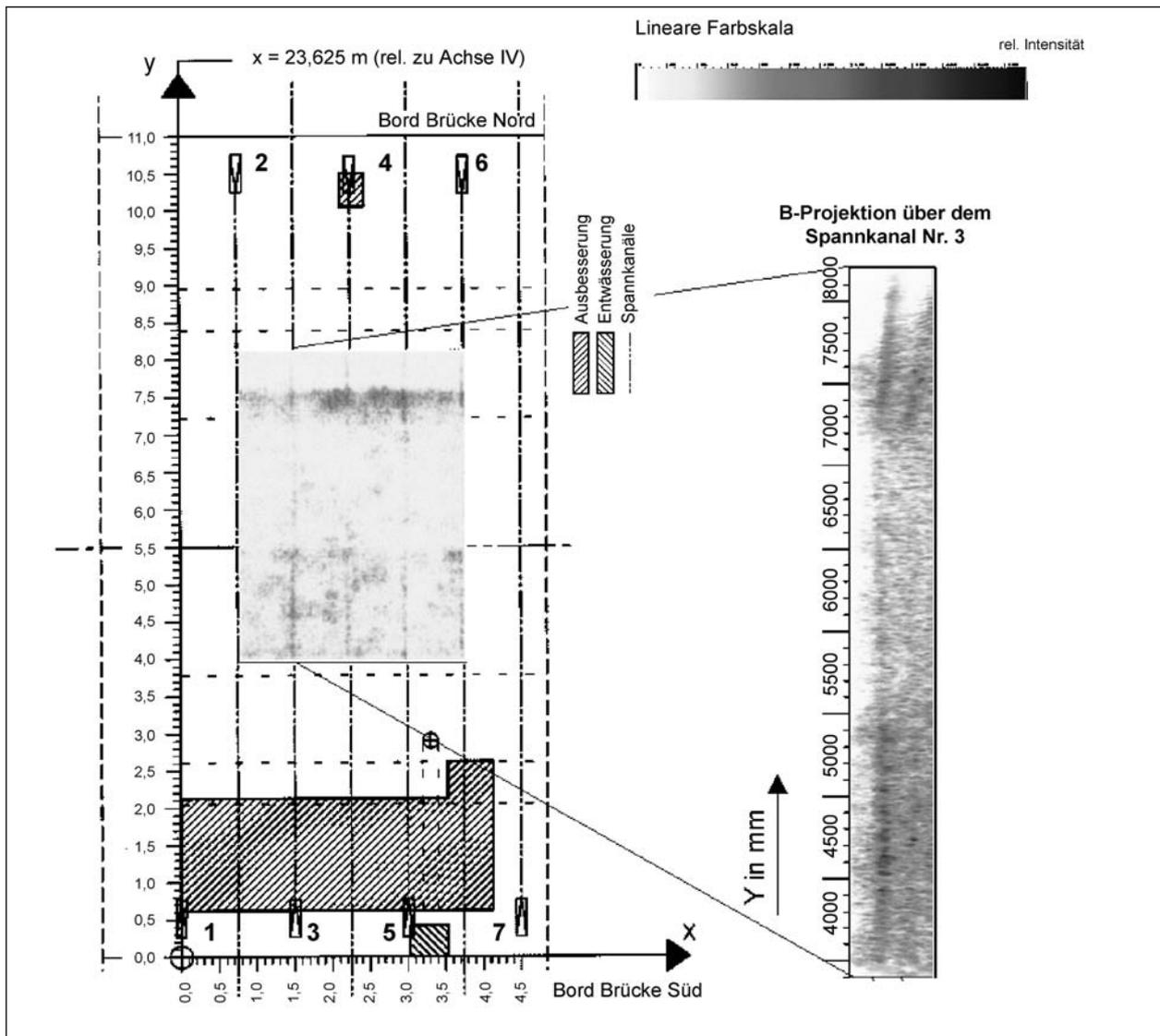


Bild 27: Ultraschall-Echo: links: Messfläche mit C-Projektion in einer Messtiefe von 5 cm-15 cm, rechts: B-Projektion entlang des Spannkanals Nr. 3 von $x = 1.420-1.509$ mm

Aus den SAFT-B-Bild-Darstellungen, längs und quer zu den Spannkanälen betrachtet, resultiert eine mittlere Plattendicke von ca. 22 cm.

In den C-Projektionen werden die Spannkanäle bezüglich ihrer horizontalen Lage sehr gut abgebildet. Der Tiefenverlauf der Spannkanäle ist in den SAFT-B-Bildern aufgrund der allgemeinen Intensitätsschwankungen über den Messbereich nicht vollständig zu erkennen. Aussagen zur Betondeckung über den Spannkanälen sind daher zurzeit nur punktuell anhand der SAFT-B-Bilder, bei denen die Querschnitte der Spannkanäle dargestellt sind, möglich.

Für den Spannkanal Nr. 3 wurde zum Beispiel eine Betondeckung von 12 cm bei $y = 5.500$ mm (Fahrbahnmitte) ermittelt. In den Bildern treten Inten-

sitätsunterschiede entlang der Spannkanäle mehrfach auf. Dennoch wird das in KRIEGER, 2002, genannte Kriterium für Verpressfehler nur in einem Bereich erfüllt. Im Abschnitt des Spannkanals Nr. 3 von $y = 4.400-5.400$ mm sind die durch SAFT-Rekonstruktion berechneten Reflexionsintensitäten aus der Tiefe des Spannkanals annähernd doppelt so hoch wie die Reflexionsintensitäten der Rückwand unterhalb dieses Spannkanals.

3.3.2 Messfelder an der Hohlkastendecke (HKD)

An der Hohlkastendecke wurde aufgrund der Geometrieverhältnisse im Hohlkasteninneren der Scanner mit der 3 m breiten Brücke montiert (Bild 8). Die schalungsglatte Oberfläche der Decke bedurfte keiner speziellen Vorbereitung.

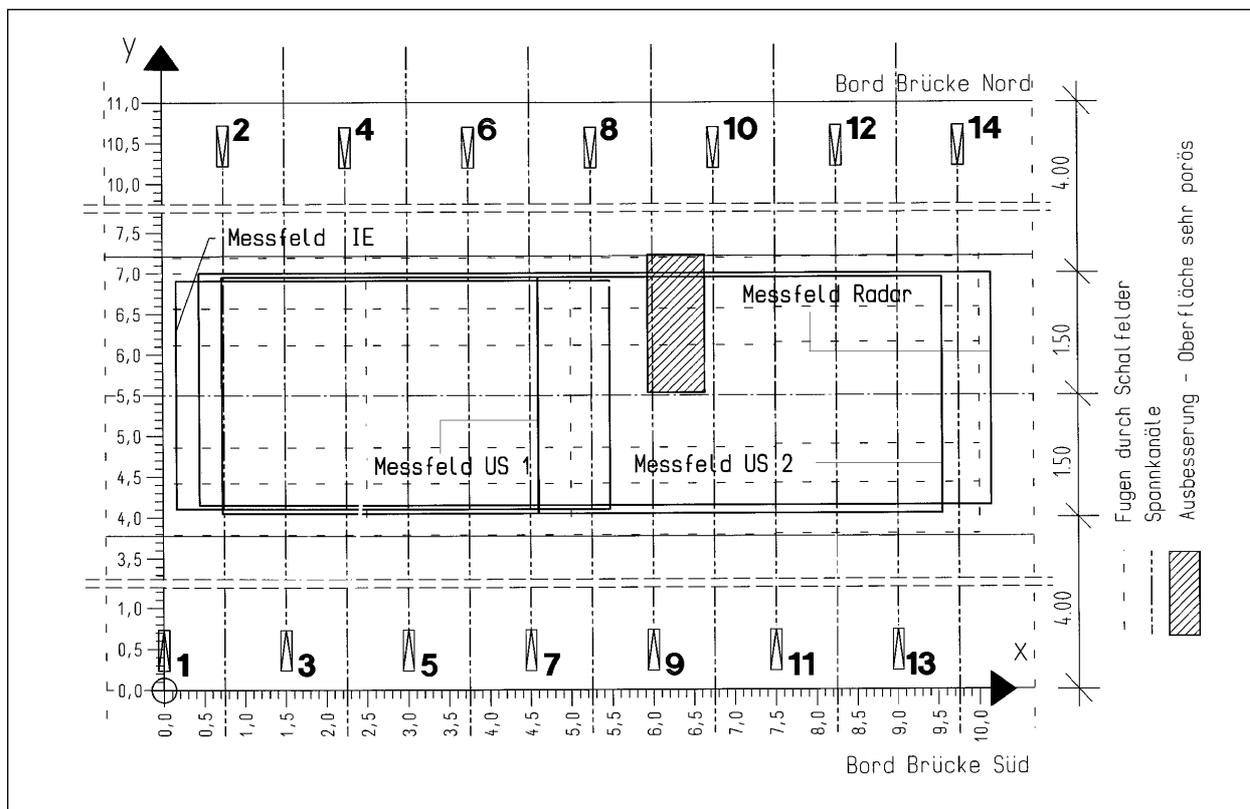


Bild 28: Messfelder von Radar, Impact-Echo und Ultraschall-Echo an der Hohlkastendecke (HKD)

Das Scannerfeld wurde längs der Brückenachse ausgerichtet und mit Radar, Impact-Echo und Ultraschall-Echo wurden die in Tabelle 1 (Kapitel 3.3) aufgeführten und in Bild 28 gekennzeichneten Flächen untersucht.

Die für die Auswertung der Ergebnisse an der Hohlkastendecke verwendeten x-y-Koordinaten entsprechen den x-y-Koordinaten auf der Fahrbahnplatte. Die Ergebnisse der durchgeführten zerstörenden Untersuchungen wurden bei den folgenden Ergebnisdarstellungen für die ZfPBau-Verfahren nicht berücksichtigt.

3.3.2.1 Radar

Die Messungen zu den folgenden Darstellungen wurden im August 2003 an der Hohlkastendecke mit der 1,5-GHz-Antenne durchgeführt.

Bild 29 zeigt das Radargramm der Messspur 16. Die Lage der entlang des Spannkanals Nr. 2 verlaufenden Messspur ist in Bild 31 gekennzeichnet. Deutlich sichtbar im Radargramm sind die Reflexionshyperbeln der quer zur Messrichtung verlaufenden Längsbewehrung in einer Tiefe von ca. 4-5 cm. Der gebogene Verlauf des Spannkanals Nr. 2 ist gut zu erkennen. Die Rückwand bzw. die Fahrbahn-

plattenoberseite ist aufgrund der Abschattung durch den Spannkanal nicht sichtbar.

Die 9,70 m lange Messspur 61 (Bild 30) verläuft dagegen quer zu den Spannkanälen. Deutlich sichtbar sind die Querbewehrung, die Lage der Spannkanäle und der Dickenverlauf der Fahrbahnplatte (24-25 cm).

In Bild 31 ist exemplarisch ein Tiefenschnitt (C-Bild) dargestellt. Der Datensatz besteht aus 195 parallel verlaufenden Messspuren mit jeweils einer Spurlänge von 2,85 m und einem Spurbstand von 5 cm.

Der Tiefenschnitt (Schnitttiefe 6,1 cm) gibt einen großflächigen Überblick von dem Verlauf der schlaffen Bewehrung und der Lage der Spannkanäle. Daneben sind in diesem Schnitt diagonal verlaufende Abstandshalter sichtbar.

Für den kompletten Radardatensatz (Polarisation senkrecht zur Messrichtung) wurden Tiefenschnitte im Abstand von 1,3 mm über die gesamte Messtiefe erzeugt und daraus ein Film erstellt. Dieser vermittelt sehr anschaulich einen Überblick über die innere Struktur der Fahrbahnplatte.

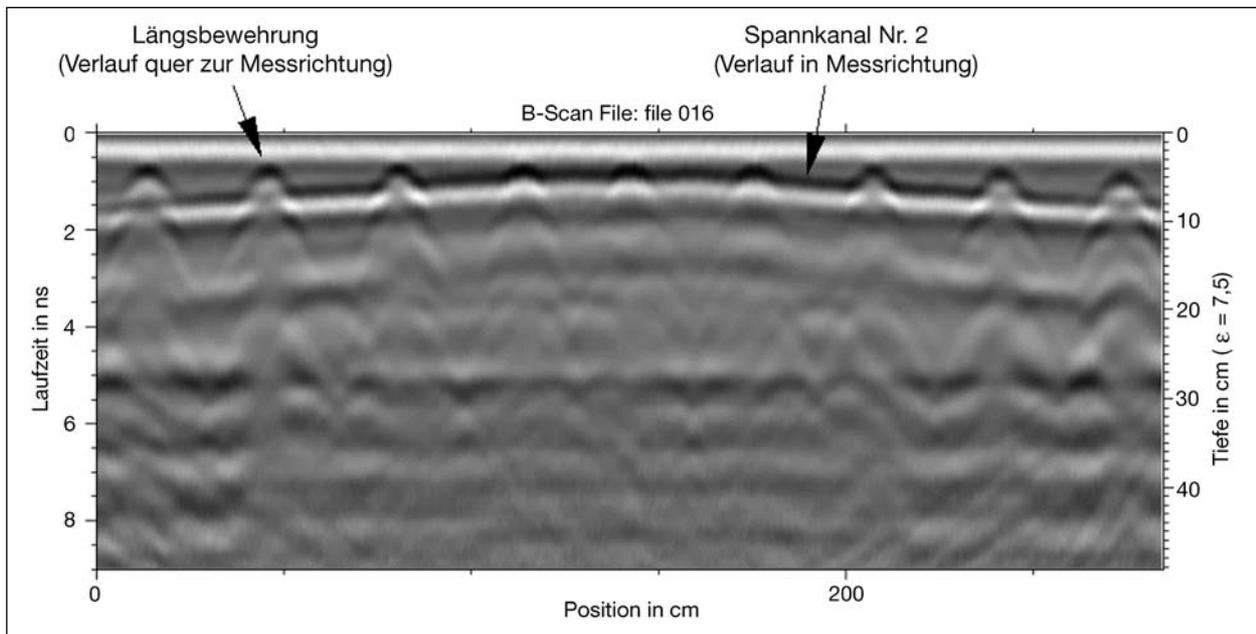


Bild 29: Radargramm der Messspur 16, aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne (Polarisation senkrecht zur Messrichtung) an der Hohlkastendecke

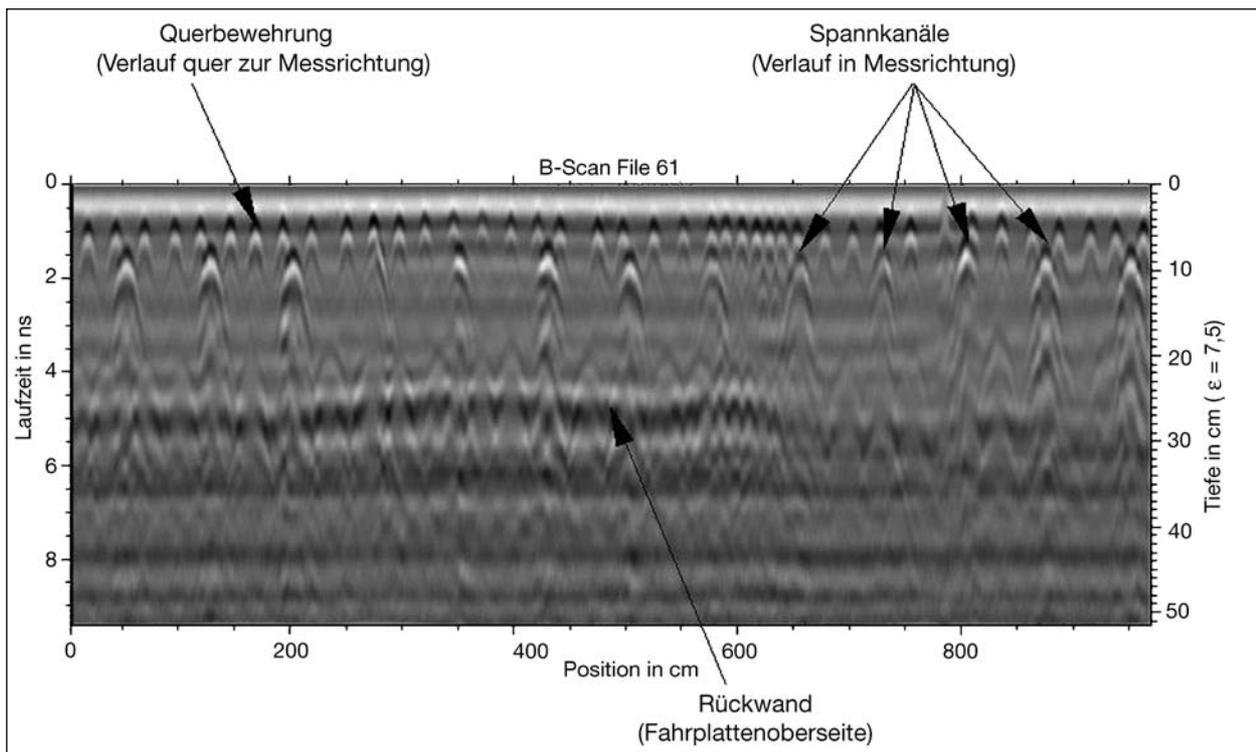


Bild 30: Radargramm der Messspur 61, aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne (Polarisation senkrecht zur Messrichtung) am Hohlkastensteg

3.3.2.2 Impact-Echo

Analog zu den Auswertungen in Kapitel 3.3.1.2 wurden auch die Datensätze der Hohlkastendecke unter Berücksichtigung einer Longitudinalwellengeschwindigkeit von 4.170 m/s interpretiert.

In Bild 32 ist eine C-Projektion mit Einzelbereichsoptimierungen im Tiefenbereich der Quervorspannung dargestellt. Im Gegensatz zu den von der Fahrbahn aus erhaltenen Ergebnissen werden die Spannkanäle durch erhöhte Intensitäten direkt in ihrer tatsächlichen Tiefe abgebildet.

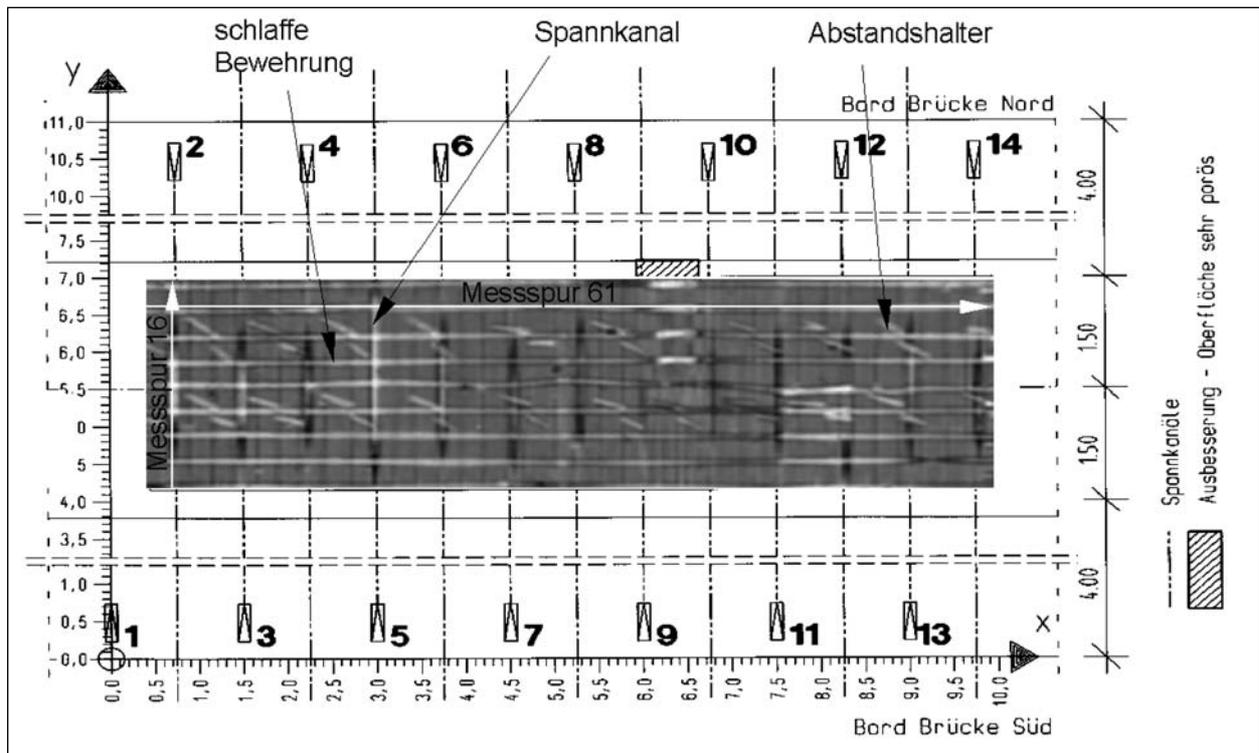


Bild 31: Radar: Tiefenschnitt in 6,1 cm Tiefe, Radardatensatz aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne mit senkrecht zur Messrichtung verlaufender Polarisationsrichtung an der Hohlkastendecke (195 parallele in y-Richtung verlaufende Messspuren)

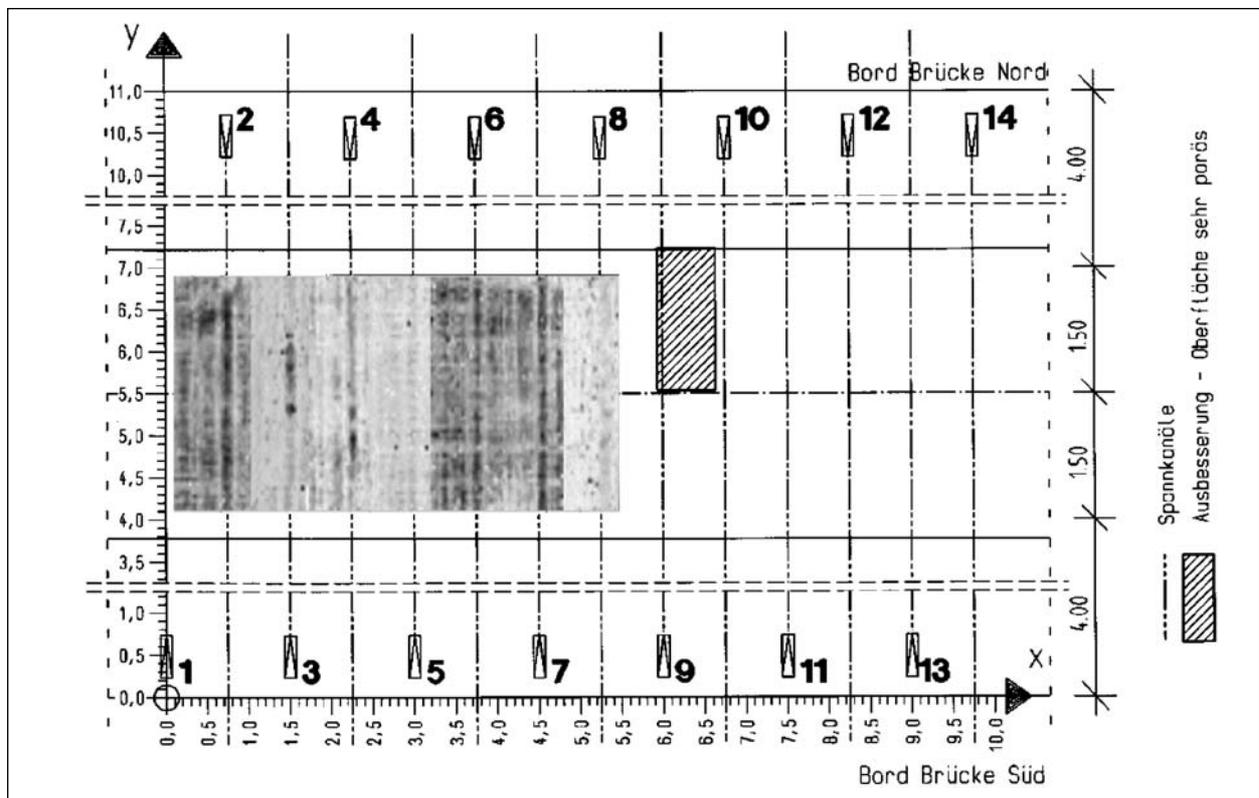


Bild 32: Impact-Echo: C-Projektion im Bereich der Spannkanäle

Die Spannkanäle Nr. 2 bis Nr. 8 können eindeutig lokalisiert werden. Eine Tiefenzuordnung ist somit punktuell möglich. Zum Beispiel wurden der

Spannkanal Nr. 2 bei $y = 5.137$ mm und der Spannkanal Nr. 3 bei $y = 5.880$ mm in einer Tiefe von 6,5 cm geortet.

In diesen Datensätzen sind wie in den Daten zum Messfeld auf der Fahrbahnplatte Amplitudenschwankungen der einzelnen Spannkanalreflexionen festzustellen.

Als mögliche Ursache kommt die Änderung der Ankoppelungsbedingungen in Frage, aber auch Änderungen der Struktur selber. Zur Klärung dieser Effekte wurden Bohrkern an auffälligen und zum Vergleich auch an eher unauffälligen Stellen entnommen.

Zerstörende Untersuchungen erfolgten speziell beim Spannkanal Nr. 3 bei $y = 5.865 + 100$ mm. Im B-Bild entlang dieses Spannkanales sind in diesem Bereich auffällig hohe Reflexionsintensitäten in der Tiefe des Spannkanales und eine stärkere Verschiebung der Rückwand zu erkennen.

3.3.2.3 Ultraschall-Echo

In dem der Achse IV zugewandten „Messfeld US1“ (Bild 28) betrug der Abstand zwischen den einzelnen Messpunkten in x- und y-Richtung 2,5 cm.

Der Ultraschall-Messkopf wurde genauso wie bei den Messungen auf der Fahrbahnplatte parallel zur y-Achse ausgerichtet.

Insgesamt wurden an 18.252 Messpositionen Einzelmessungen durchgeführt. Die 3D-SAFT-Rekonstruktion der Messdaten erfolgte zunächst unter Berücksichtigung einer Transversalwellengeschwindigkeit von 2.500 m/s.

In Bild 33 (links) ist die SAFT-C-Projektion über den Tiefenbereich der Spannkanaäle in die Übersichtsskizze eingefügt. In Bild 34 werden die berechneten Intensitäten aus dem Tiefenbereich der der Messfläche zugewandten schlaffen Bewehrung dargestellt.

Die Spannkanaäle Nr. 2 bis Nr. 7 sind in beiden SAFT-Projektionen deutlich zu erkennen. Auch die Längsbewehrung der unteren Bewehrungslage wird abgebildet. Zum Teil sind die, bei Radar sehr deutlich abgebildeten, diagonal verlaufenden Abstandshalter zu erkennen. Eine Zuordnung der Querbewehrung ist nicht möglich. Hier wird vermutet, dass die Polarisationsrichtung der Transversalwellen einen noch weiter zu untersuchenden Einfluss hat.

Wie bei den Ergebnissen der Messungen auf der Fahrbahnplatte werden die Spannkanaäle in den

SAFT-C-Projektionen gut abgebildet. Die Betondeckung über den Spannkanaelen lässt sich anhand der SAFT-B-Projektionen nur punktuell bestimmen.

Die neben dem Spannkanal Nr. 5 zwischen den y-Koordinaten von 6.000 mm bis 6.500 mm auftretenden flächigen Reflexionen (z. B. in Bild 33) sind keiner Tiefe zuzuordnen.

Im „Messfeld US2“ (Bild 28) erfolgten die Ultraschall-Echo-Messungen mit einer größeren Schrittweite von 5 cm. Die Fläche wurde mit insgesamt 15.900 Punktmessungen abgetastet.

Durch den größeren Messpunktstand wurde die für diese Fläche benötigte Messzeit deutlich reduziert. Nachteilig ist, dass das für die SAFT-Berechnungen anzustrebende Abtasttheorem mit einer Schrittweite von 5 cm nicht eingehalten wird. Eine Rückrechnung auf die dreidimensionale Reflektorverteilung im Prüfobjekt (3D-SAFT) erfolgte daher nicht.

Die Interpretation der Ergebnisse zu „Messfeld US2“ beruht auf C- und B-Bildern, in denen die gemessenen Schalldrücke unmittelbar über der Laufzeit bzw. unter Berücksichtigung der Transversalwellengeschwindigkeit von 2.500 m/s über der Messtiefe abgebildet werden.

In Bild 33 (rechts) ist das C-Bild in einer Tiefe von 8 cm integriert. Neben den Spannkanaelen Nr. 8 bis Nr. 13 ist zum Teil die der Messfläche zugewandte Längsbewehrung abgebildet. Wie bei den SAFT-Ergebnissen wird die Querbewehrung nicht angezeigt.

Die an der Hohlkastendecke zu erkennende Ausbesserung zwischen den Spannkanaelen Nr. 9 und Nr. 10 zeichnet sich auch in den C-Bildern bis in die Tiefe der Spannkanaele ab.

Im Gegensatz zur horizontalen Lage der Spannkanaele kann deren Tiefenverlauf nur punktuell bestimmt werden. Wie die Abbildungsbeispiele zeigen, unterscheiden sich die Spannkanaele in ihrem Reflexionsverhalten. Hinreichende Indizien für unzureichende Verpressungen gibt es nicht.

Der im Abschnitt des Spannkanales Nr. 3 von $y = 4.400$ mm bis $y = 5.400$ mm bei den Messungen von der Fahrbahnplattenoberseite aus als auffällig geortete Bereich ist auch hier durch höhere Reflexionsintensitäten des Spannkanales erkennbar.

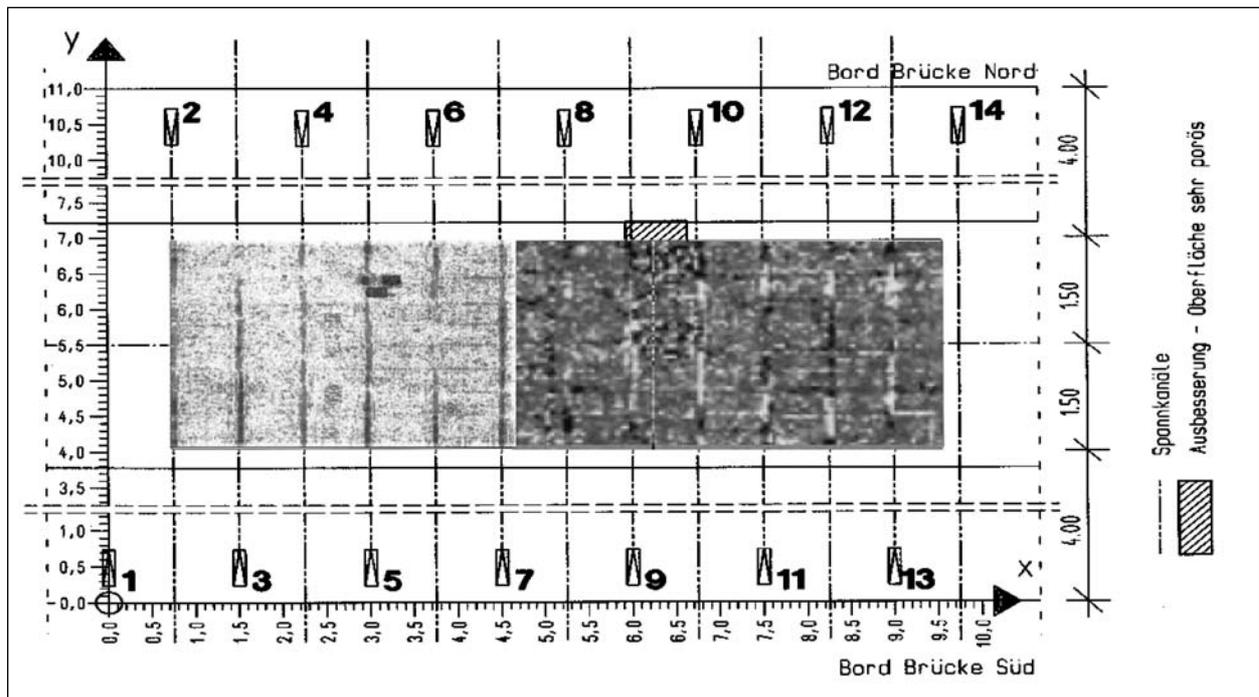


Bild 33: Ultraschall-Echo: Messfläche mit SAFT-C-Projektion in einer Messtiefe von 11,7 cm bis 12,1 cm (links) und C-Bild in einer Messtiefe von ca. 8 cm (rechts)

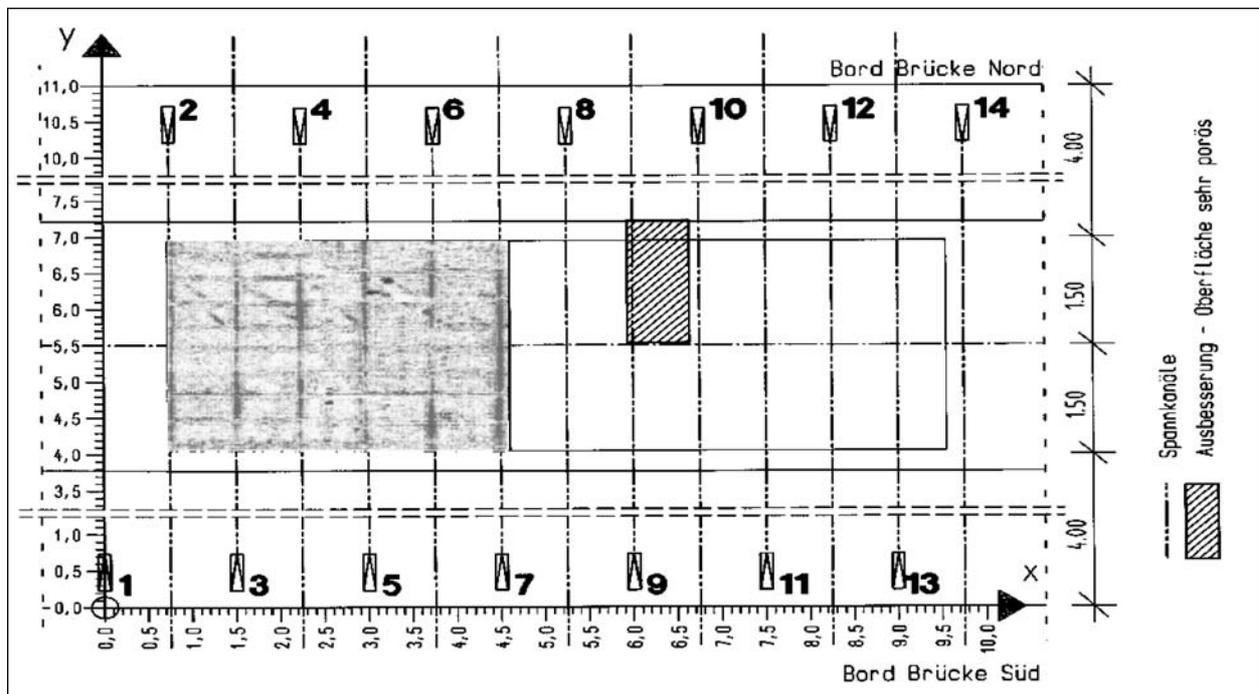


Bild 34: Ultraschall-Echo: Messfläche mit SAFT-C-Projektion in einer Tiefe von 2,0 cm-5,0 cm

Außerhalb der Spannkanäle konnten bis auf die Ausbesserungsstelle zwischen den Spannkanälen Nr. 9 und Nr. 10 keine Auffälligkeiten wie z. B. Verdichtungsmängel festgestellt werden.

3.4 Ergebnisse der zerstörungsfreien Untersuchungen am Hohlkastensteg

Die Spannglieder der Längsvorspannung wurden in den Hohlkastenstegen parabolisch verlegt und alle 42 m vollständig gekoppelt.

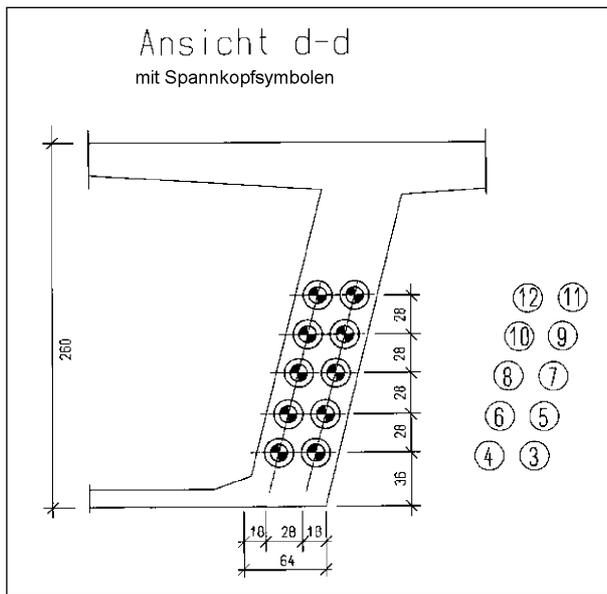


Bild 35: Schnitt im Bereich der Koppelglieder

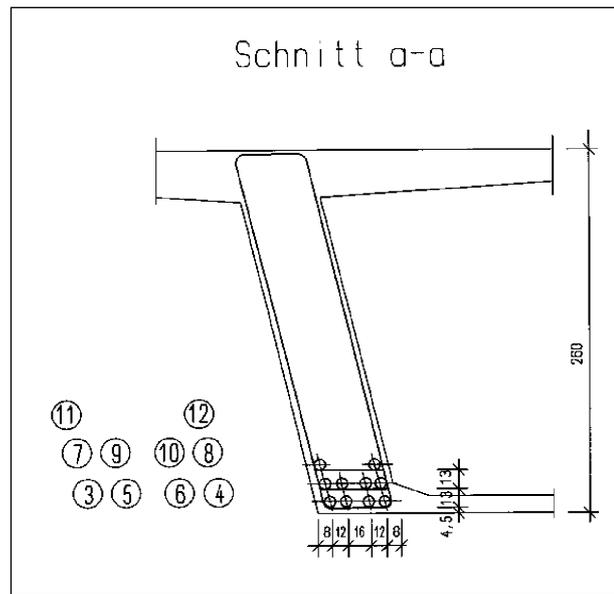


Bild 36: Schnitt im Bereich der Tiefpunkte

Verfahren	Hohlkastensteg HKS
Radar	1,54 m x 4,00 m
Impact-Echo	-
Ultraschall-Echo	1,45 m x 4,00 m

Tab. 3: Messflächen/Messeinsatz vom 11.08.03-27.08.03

Die Breite der Stege ändert sich und beträgt zwischen 55 cm und 95 cm.

In den mittleren Brückenfeldern befinden sich in jedem Steg 10 Spannglieder des Typs ZS 111.

Die Anordnung der Spannglieder zueinander ändert sich während ihres Verlaufs. Im Koppelbereich sind in 5 Lagen jeweils zwei Koppelglieder angeordnet (Bild 35). In den Tiefpunkten liegen die Spannglieder auf 3 Lagen verteilt vor (Bild 36).

Die Messungen mit Radar und Ultraschall-Echo wurden im August 2003 an der Innenseite des nördlichen Steges durchgeführt.

Während das Radar-Verfahren ohne Scanner angewendet wurde, erfolgten die Ultraschall-Echo-Messungen automatisiert. Dazu wurde der kleine Scanner am ca. 2,10 m hohen Hohlkastensteg installiert.

Die dabei untersuchten Flächen sind Tabelle 3 zu entnehmen. Auf Messungen mit Impact-Echo an diesem Bauteil musste aufgrund eines Defekts verzichtet werden.

3.4.1 Messfelder am Hohlkastensteg (HKS)

Die Längsvorspannglieder im Feld zwischen Achse IV und V wurden, wie in Bild 37 dargestellt, zwischen den Koppelfugen und den Tiefpunkten untersucht.

Bis auf das Anzeichnen der Messspuren für die manuellen Radarmessungen waren auf der schalungsglatten Oberfläche des Steges keine weiteren Vorbereitungen vor den Messungen notwendig.

Die Ergebnisse der Messungen am Hohlkastensteg sind in den folgenden Abschnitten aufgeführt. Die Resultate der durchgeführten zerstörenden Prüfungen wurden bei der Interpretation der ZfPBau-Ergebnisse zunächst nicht berücksichtigt.

3.4.1.1 Radar

In Bild 38 und Bild 39 sind zwei Tiefenschnitte dargestellt. Der Datensatz besteht aus 41 parallel verlaufenden Messspuren mit jeweils einer Spurlänge von 1,54 m. Die Messspuren wurden mit der 1,5-GHz-Antenne bei einem Spurbabstand von 10 cm aufgenommen.

Der Tiefenschnitt in 5,8 cm Tiefe (Bild 38) zeigt deutlich die horizontal verlaufende schlaife Bewehrung. Bei einer Schnitttiefe von 15,6 cm (Bild 39) ist die Lage der dem Hohlkasteninneren zugewandten Spannkanäle deutlich sichtbar.

Aus den Radardaten ergibt sich für die innenliegende schlaife Bewehrung unter Berücksichtigung einer Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r = 7,5$ eine Be-

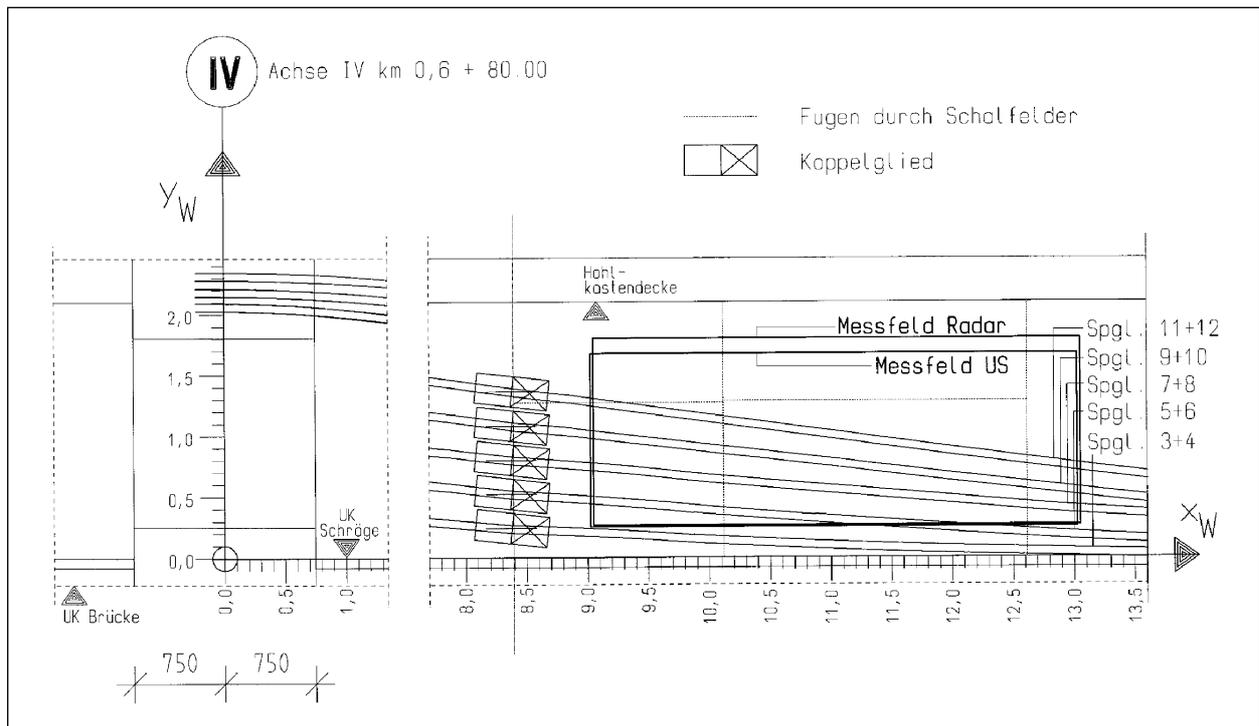


Bild 37: Messfläche am Hohlkastensteg mit den Messfeldern von Radar und Ultraschall-Echo

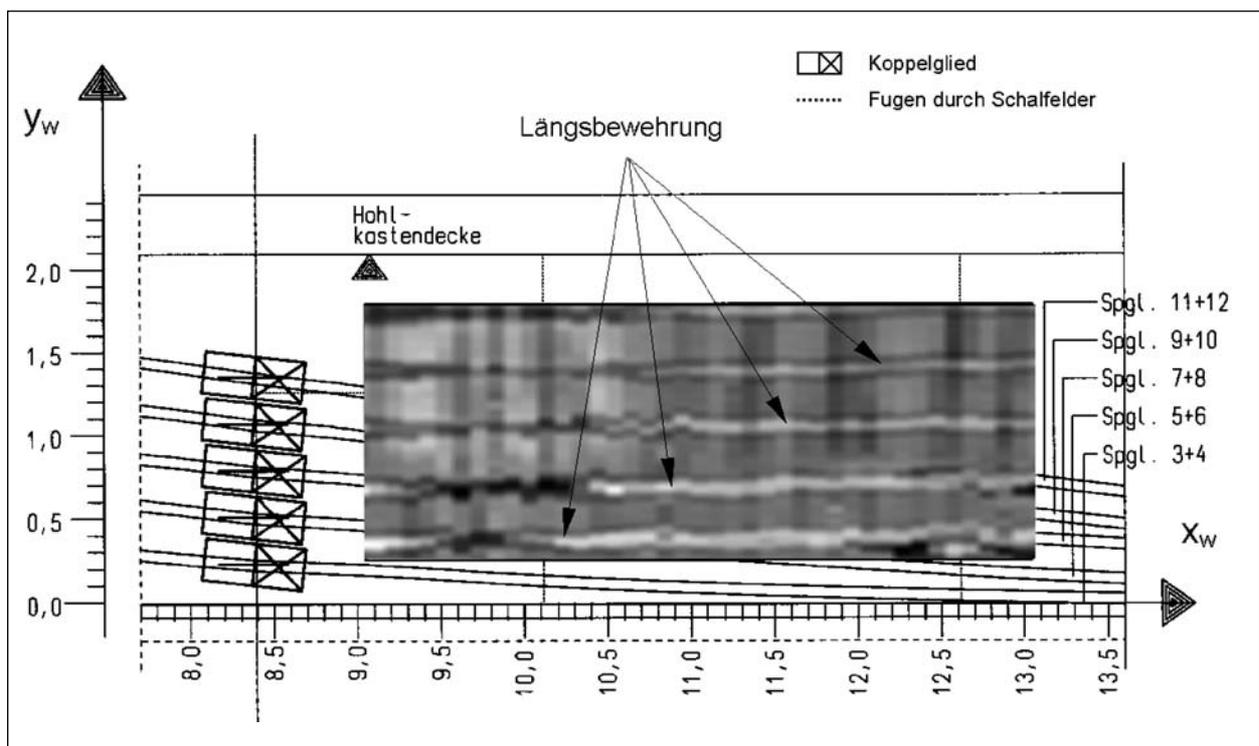


Bild 38: Radar: Tiefenschnitt in 5,8 cm, Radardatensatz aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne mit senkrecht zur Messrichtung verlaufender Polarisationsrichtung am Hohlkastensteg (41 parallele in y-Richtung verlaufende Messspuren, Spurlänge $l = 1,54$ m, Spurbstand = 10 cm)

tondeckung von $c = 3,5$ cm. Die Überdeckung der Spannkanäle beträgt 6-17 cm. Die Stegdicke und die außen liegende Bewehrung konnten nicht eindeutig detektiert werden.

Wie bei der Fahrbahnplatte wurden für den mit der 1,5-GHz-Antenne aufgenommenen Radardatensatz (Polarisation senkrecht zur Messrichtung) Tiefenschnitte im Abstand von 1,3 mm erzeugt und

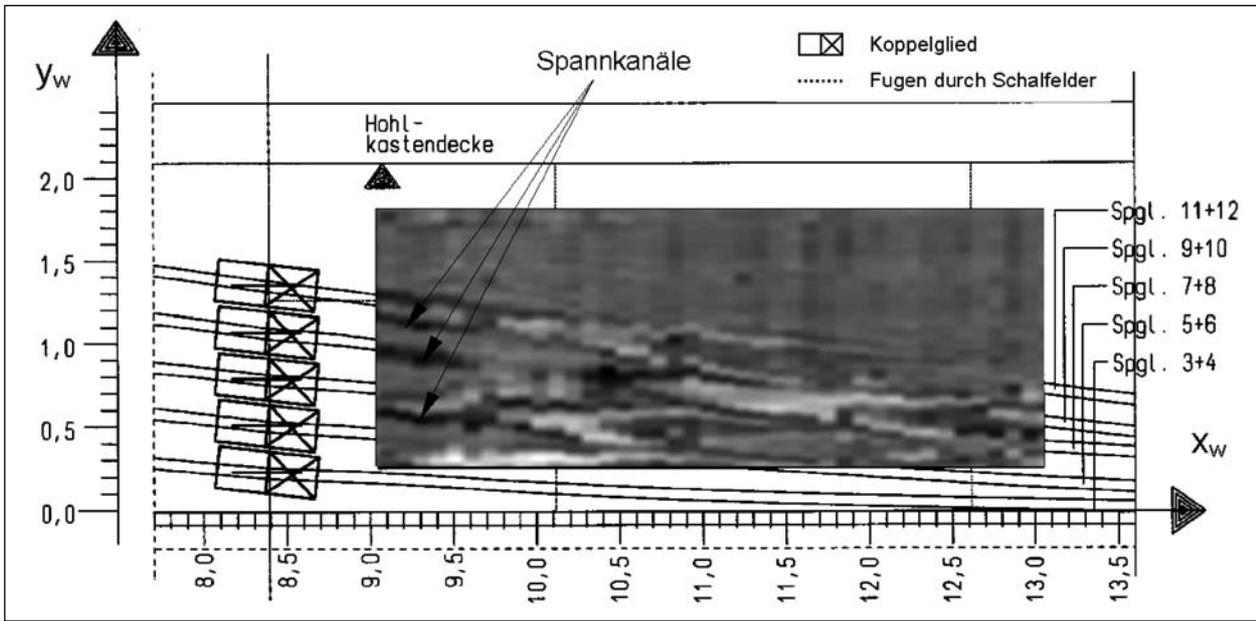


Bild 39: Radar: Tiefenschnitt in 15,6 cm, Radardatensatz aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne mit senkrecht zur Messrichtung verlaufender Polarisationsrichtung am Hohlkastensteg (41 parallele in y-Richtung verlaufende Messspuren)

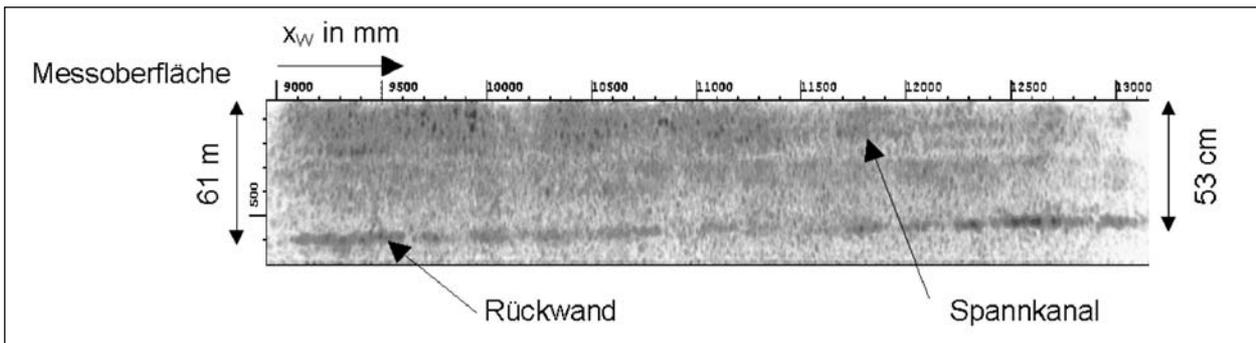


Bild 40: Ultraschall-Echo, Messfeld HKS: SAFT-B-Projektion entlang der x_w -Achse bei $y_w = 400-1.010$ mm (horizontaler Schnitt durch den gevouteten Hohlkastensteg)

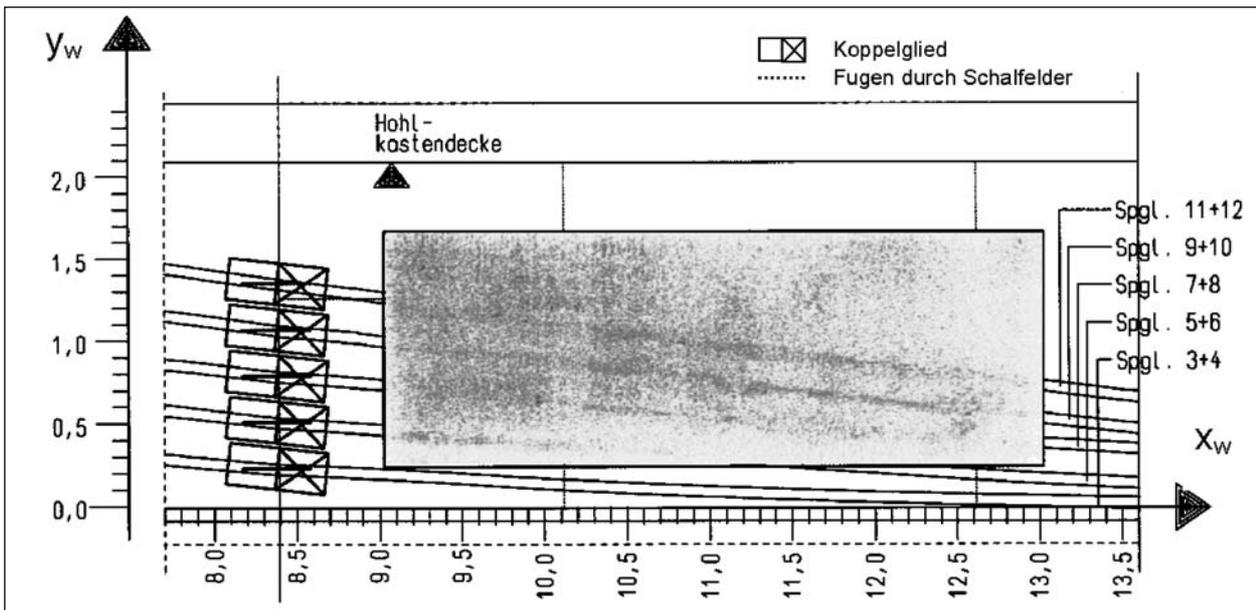


Bild 41: Ultraschall-Echo, Messfeld HKS: SAFT-C-Projektion in einer Tiefe von 102 m-202 mm

daraus ein Film erstellt. Die innen liegende Bewehrung sowie die Spannglieder, deren Lage sich sowohl horizontal als auch vertikal verändert, werden im Film sehr anschaulich dargestellt.

3.4.1.2 Ultraschall-Echo

Bei den Ultraschall-Echo-Messungen am Hohlkastensteg wurde eine Schrittweite von 2,5 cm gewählt. Für die Interpretation wurden die Messdaten mit 3D-SAFT rekonstruiert. Den folgenden Darstellungen liegen somit die für jedes Volumenpixel im Bauteil rückgerechneten Reflexionsintensitäten zu Grunde.

Wie in Bild 40 exemplarisch dargestellt, kann anhand von B-Bild-Projektionen in y_w -Richtung die sich ändernde Stegdicke zwischen 53 cm und 61 cm gut wiedergegeben werden. Die Spannkanele und die schlaffe Bewehrung wiederum sind nicht deutlich abgebildet. Die der Messfläche zugewandten Hüllrohre sind in der SAFT-C-Projektion in Bild 41 zu erkennen.

Der sich sowohl horizontal als auch vertikal verändernde Verlauf der Spannkanele zeigt sich am deutlichsten in einem aus SAFT-C-Projektionen zusammengestellten Film. Dazu wurden von den für den Hohlkastensteg SAFT-rekonstruierten Daten Projektionen jeweils über eine Tiefe von 10 mm erzeugt und so zusammengefügt, dass die Reflexionen in den Messtiefen von 6-70 cm Tiefe zu erkennen sind.

Generell sind die Reflexionsintensitäten der Spannkanele sehr gering, insbesondere im Vergleich zu den Rückwandechos. Dieser Umstand ist zum einen auf die für ein Durchschallungsverfahren doch komplizierten Geometrieverhältnisse, zum anderen auf eine gute Verpressung der Spannkanele zurückzuführen. Auffälligkeiten, die auf Verpressfehler in den Spanngliedern oder auf Verdichtungsmängel im Betongefüge hinweisen, wurden nicht festgestellt.

3.5 Zusammenfassung der ZfPBau-Ergebnisse

In dieser Zusammenfassung sind ausschließlich die ZfPBau-Ergebnisse aufgeführt, die vor Kenntnis der zerstörenden Untersuchungen erzielt wurden.

Die Radarergebnisse vermitteln einen sehr guten Einblick in die innere Struktur der untersuchten Bauteile. Die Lage und Betondeckung der

Messfläche zugewandten Längs- und Querbewehrung sowie der Spannkanele werden eindeutig bestimmt. Trotz Abschattung sind teilweise auch Aussagen zur schlaffen Bewehrung unterhalb der Spannkanele möglich.

Für die Fahrbahnplatte wurde eine Dicke von 24-25 cm ermittelt. Die Außenseite des Hohlkastensteges ist aufgrund der Abschattung durch die schlaffe Bewehrung und die Längsspannglieder sowie der großen Stegstärke nicht eindeutig zu detektieren.

In Hinblick auf die Eindringtiefe und die Auflösung erwies sich die 1,5-GHz-Antenne als geeignet. Die aussagefähigsten Abbildungen werden mit einer Ausrichtung des von der Radarantenne abgestrahlten elektrischen Feldes senkrecht zur Messrichtung erzielt.

Die Messungen mit Impact-Echo und Ultraschall-Echo auf den verhältnismäßig großen Messflächen zeigen, dass die Spannkanele parallel zur Messfläche sehr gut geortet werden.

Ergänzend zu den Ausführungen in Kapitel 3.3.2.3 ist im Bild 42 ein aus den Ultraschallmessdaten durch FT-SAFT erzeugtes FT-SAFT-C-Bild in der Messtiefe von 8,8 cm dargestellt. Es zeigt die Spannkanele Nr. 8 bis Nr. 13, die an der Hohlkastenstendecke mit Ultraschall-Echo bei einer Schrittweite von 5 cm detektiert wurden. Obgleich die Schrittweite größer als die Ultraschallwellenlänge ist, konnte in diesem Fall eine sinnvolle Rekonstruktion des betrachteten Volumens erstellt werden.

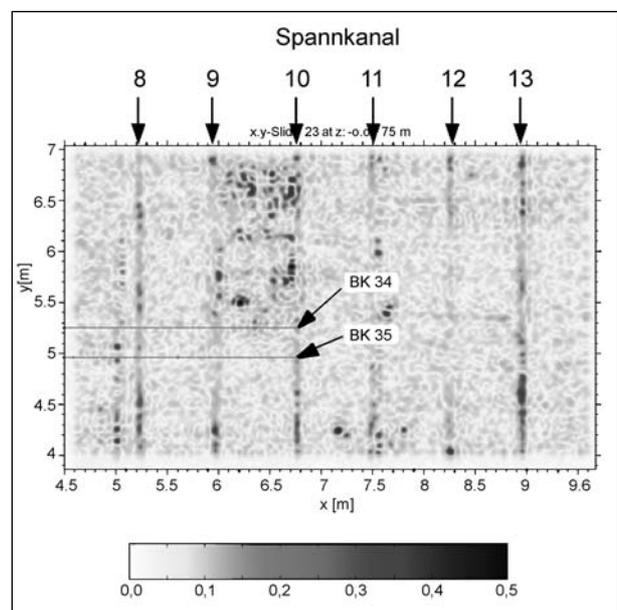


Bild 42: Ultraschall-Echo, Messfeld HKD: FT-SAFT-C-Bild in einer Messtiefe von 8,8 cm, $v = 2.700$ m/s

Spannkanal, Messfeld	y-Koordinaten in mm	Verfahren	Anzeige
Nr. 3, HKD	5.865 ± 100	Impact-Echo	Intensitätszunahme am Spannkanal und deutliche Verschiebung der Rückwand
Nr. 3, HKD + FBP	4.500-5.000		Intensitätserhöhung am Spannkanal bei den Messungen auf der FBP und an der HKD

Tab. 4: Hinweis auf nicht vollständig verfüllte Hüllrohbereiche

Fragestellung	Verfahren
Verifizierung der Tiefenlage der Spannkanäle bei Quer- und Längsvorspannung	Impact-Echo, Ultraschall-Echo, Radar
Diagonalebewehrung an der Unterseite der Fahrbahnplatte – Abstandshalter zwischen oberer und unterer Bewehrung?	Radar, Ultraschall-Echo an HKD
Intensitätszunahme über die gesamte Messfeldbreite an der HKD im Übergangsbereich zur Voute ($y = 7.200-7.500$ mm)	Ultraschall-Echo
Reflexionsschwankungen in den Spannkanälen	Impact-Echo, Ultraschall-Echo

Tab. 5: Allgemeine Fragestellungen

Die Betondeckung über den Spannkanälen kann auf der Grundlage der bisherigen Ergebnisse nur punktuell angegeben werden.

Mit Ultraschall-Echo wurde teilweise auch die schlaffe Bewehrung geortet. Die Dicke der untersuchten Bauteile ließ sich mit beiden akustischen Verfahren bestimmen. Im Gegensatz zu Radar kann mittels Ultraschall-Echo auch die Breite des Hohlkastensteges mit Werten zwischen 53-61 cm angegeben werden.

Bei der bildgebenden Darstellung der Impact-Echo-Daten von der Hohlkastendecke sind die Spannkanäle als direkte Reflexionen im C-Projektionsbereich der Spannkanäle zu erkennen. Von der Fahrbahnoberseite wiederum wurden die Spannlieder in Querrichtung nicht als direkte Reflexionen im Tiefenbereich der Spannkanäle angezeigt. Die Verteilung der Spannkanäle über die untersuchte Fläche kann nur anhand der Rückwandverschiebungen zu kleineren Frequenzen hin lokalisiert werden.

Für beide akustische Verfahren gilt, dass die bei den Messungen an der schalungsglatten Hohlkas-

tendecke erfassten Messdaten deutlichere Aussagen zur inneren Struktur der Fahrbahnplatte ermöglichen. In den Darstellungen der von der Fahrbahnoberseite aus ermittelten Messdaten treten Effekte auf, die auf Ankoppelschwankungen der Sensoren an die rauere Messoberfläche zurückzuführen sind. Auffälligkeiten im Betongefüge wie Verdichtungsmängel waren nicht festzustellen.

Hinweise auf nicht vollständig verfüllte Spannkanäle ergaben sich nur für zwei Bereiche im Spannkanal Nr. 3. Wie in Tabelle 4 deutlich wird, stimmen die mit Impact-Echo und Ultraschall-Echo inspizierten Bereiche nicht überein.

Im Nachgang wurden in diesen Bereichen Bohrkernentnommen. Bei der Festlegung weiterer Untersuchungsstellen für die zerstörenden Prüfungen wurden die in Tabelle 5 aufgeführten Fragestellungen berücksichtigt. Die Ergebnisse sind im Kapitel 3.6 aufgeführt.

3.6 Zerstörende Untersuchungen

Auf der Grundlage der ZfPBau-Ergebnisse vom August 2003 wurden im November 2003 endoskopische Untersuchungen und Bohrkernentnahmen durch die BAM, FG IV.4, durchgeführt. Zunächst sollten die Lage der Spannkanäle und der schlaffen Bewehrung sowie die Bauteildicke der Fahrbahnplatte überprüft werden. Außerdem wurden Bohrkernentnahmen an Positionen, die für die Zustandsbeurteilung der Spannkanäle besonders interessant waren, entnommen. Auf der Fahrbahnplatte wurde die Lage der Querspannglieder mit Markierungsspray angezeichnet und die Spannkanäle Nr. 2, Nr. 3 und Nr. 6 untersucht.

Weitere Bohrkernentnahmen erfolgten im März 2004 durch die Firma DIA-TOP.

Die zerstörenden Untersuchungen am Hohlkastensteg konzentrierten sich auf die der Hohlkasteninnenseite zugewandten Spannkanäle Nr. 8, Nr. 10 und Nr. 12. Hier wurden insgesamt drei Stellen mit einem Endoskop sondiert und acht Bohrkernentnommen (Bild 43).

Endoskopische Untersuchungen

Für die endoskopischen Untersuchungen wurde an den vorgesehenen Positionen für die Sondierungen die obere Bewehrung mit einem Bewehrungssuchgerät (Profometer) geortet und Bohrlöcher mit einem Durchmesser von 20 mm bis in die Tiefe der

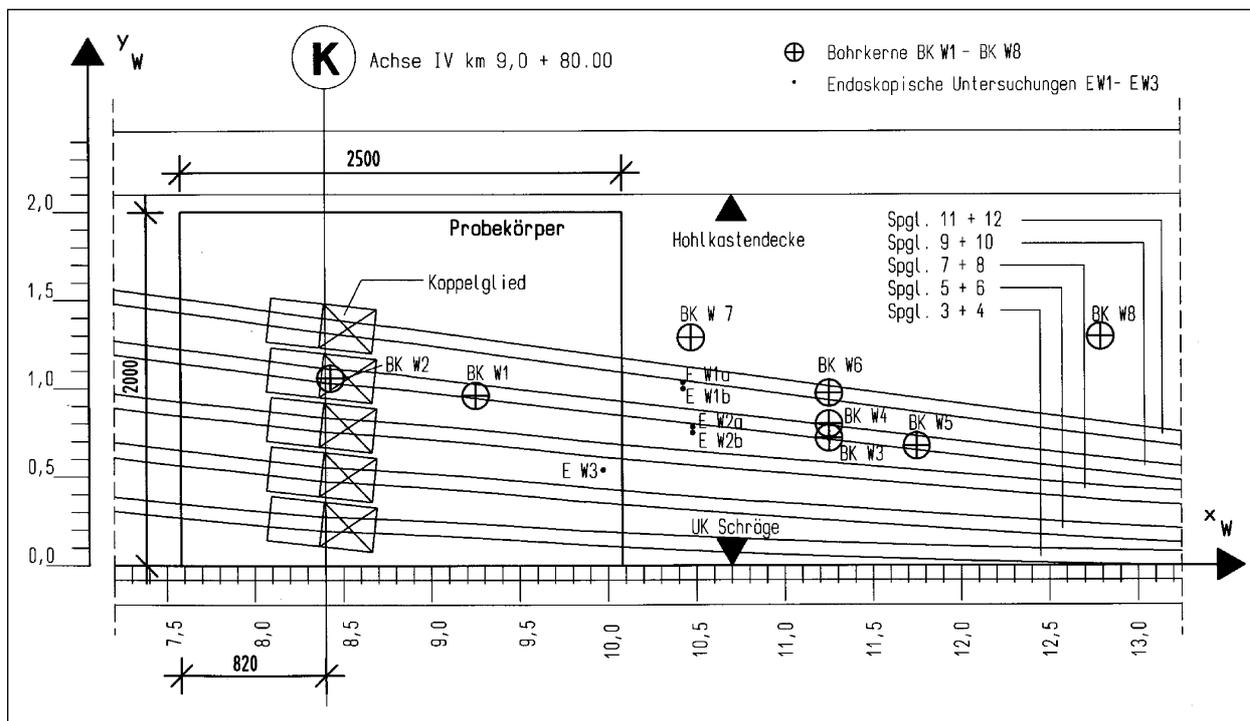


Bild 43: Positionen der Sondierungen und der Bohrkernentnahmen am Hohlkastensteg (Ansicht Innenseite)

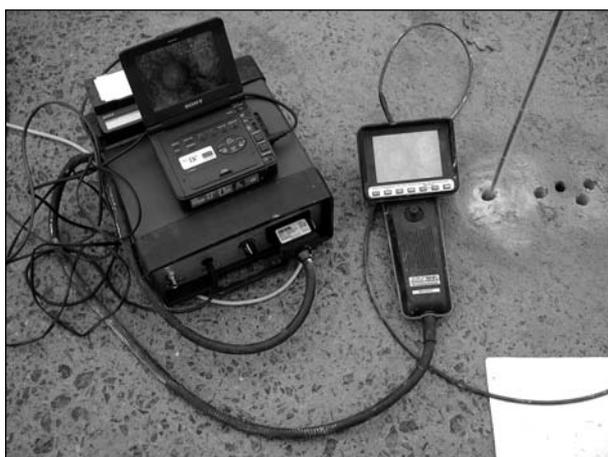


Bild 44: Videoskop

Spannkanäle gebohrt. Für die Endoskopie kam ein Videoskop vom Typ Video Probe XL AMS/Freeze Frame mit Lichtquelle XL 240 LS/Light source (Bild 44) zum Einsatz.

Nach Entfernung loser Bestandteile wurde die an einem Sondenschlauch befindliche Sonde (Durchmesser 6 mm) in die Bohrlöcher eingeführt, die Sichtflächen mit Hilfe eines CCD-Chips an der Spitze der Sonde aufgezeichnet und auf dem Bildschirm des Gerätes dargestellt. Interessante Sondierbereiche wurden zusätzlich mit einem angeschlossenen Videorekorder aufgezeichnet.

Das Videoskop kann sowohl mit einer Sondenspitze für Geradeausblick als auch mit Seitenblickadapter (Blick 90° zur optischen Achse) betrieben werden. Beide Möglichkeiten wurden angewendet. Die Sondenspitze selbst ist über einen Joystick beweglich.

Entnahme von Bohrkernen

Die Kernbohrungen mit einem Durchmesser von 150 mm erfolgten im Bereich der Fahrbahnplatte, mit Ausnahme der Entnahmestellen BK 10 und BK 24, über die gesamte Plattendicke.

In dem untersuchten Messfeld des Hohlkastensteges wurden die Bohrkern BK W1 und BK W3-BK W8 entnommen. Zusätzlich erfolgte eine Bohrung über dem Koppelglied des Spannkanals Nr. 10, BK W2.

Die Bohrungen BK W1 bis BK W6 reichen in Tiefen von ca. 14-46 cm. Die Kernbohrungen BK W7 und BK W8 erfolgten zur Dickenbestimmung außerhalb der Spannkanalführungen über die gesamte Stegbreite.

Entnahme eines Probekörpers aus dem Hohlkastensteg

Um die Forschungsarbeit in Bezug auf die Anwendung von ZfPBau-Verfahren an bautechnisch ver-

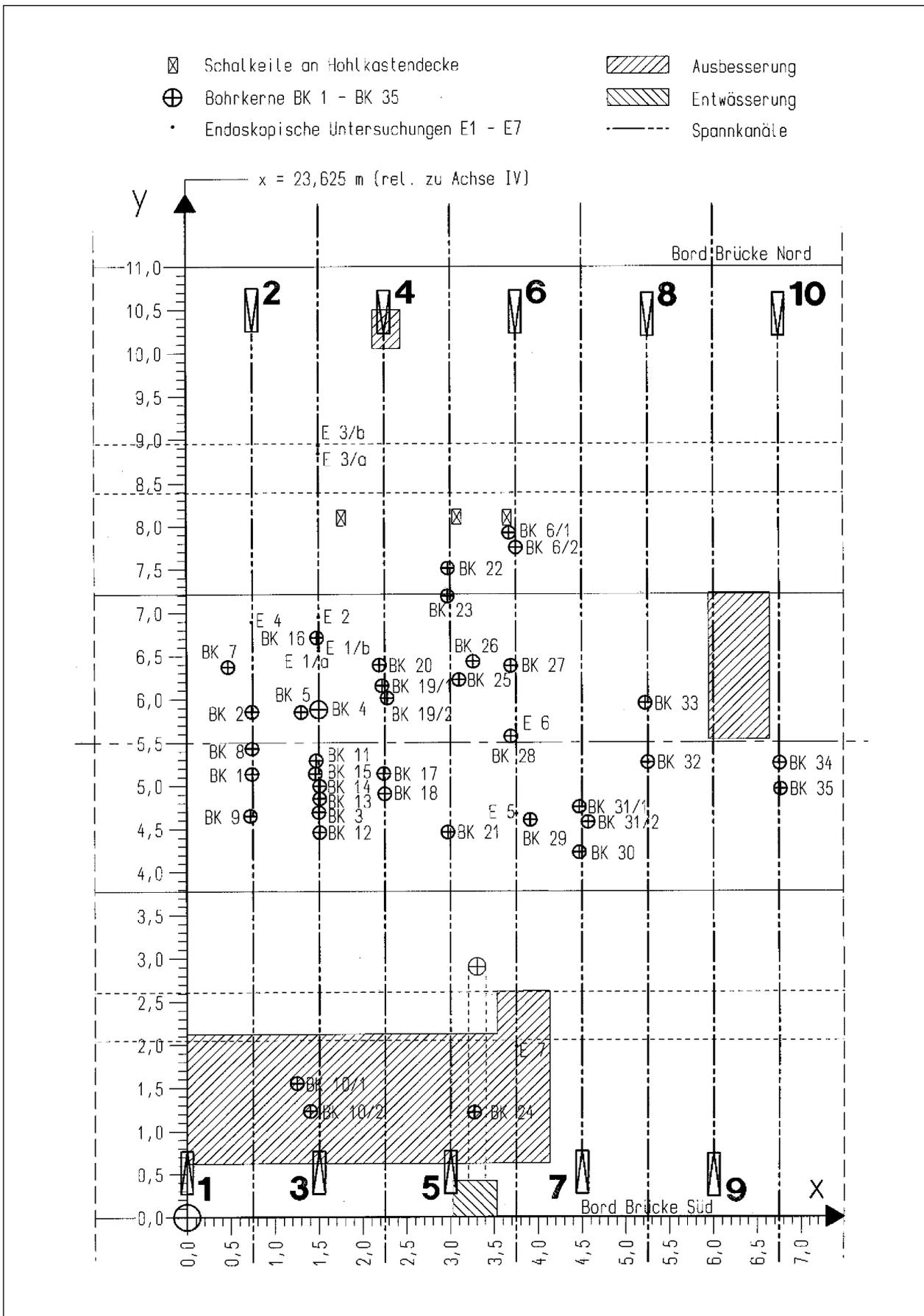


Bild 45: Positionen der Sondierungen und der Bohrkernentnahmen auf der Fahrbahnplatte



Bild 46: Probekörper aus dem Hohlkastensteg, Lagerung auf dem Testgelände der BAM in Horstwalde

pressten Spannkanälen fortsetzen zu können, wurde ein Probekörper aus dem Hohlkastensteg des Brückenbauwerks A 66/Eichenzell im Zuge des Rückbaus im August 2004 herausgeschnitten. Die Entnahme erfolgte im Bereich der Arbeitsfuge in unmittelbarer Nähe des untersuchten Messfeldes HKS.

Die Lage des Probekörpers im Hohlkastensteg ist im Bild 43 skizziert. Die Abmaße des Probekörpers betragen ca. 1,90 m x 2,60 m x Stegbreite (0,60-0,69 m); neben den Spannkanälen enthält dieser 10 Koppelglieder.

Zur Beurteilung von Koppelgliedern und deren Umgebung wurden die ZfPBau-Verfahren im Rahmen der bisherigen Forschungstätigkeit noch nicht angewendet. Dieser Probekörper ermöglicht somit erstmalig eine systematische Studie zur Detektierbarkeit dieser für die Zustandsbeurteilung von Spannbetonbrücken wichtigen Konstruktionselemente mittels ZfPBau-Verfahren.

Der Probekörper steht auf dem Freiversuchsgelände der BAM in Horstwalde zur Verfügung (Bild 46). Da sich der Rückbau der Brücke und somit die Entnahme des Probekörpers beträchtlich verzögerten, konnten die vorgesehenen Messungen mit den ZfPBau-Verfahren noch nicht durchgeführt werden.

3.6.1 Ergebnisse der zerstörenden Untersuchungen

Mit Ausnahme der Sondierungen E7 (Fahrbahnplatte) und E W3 (Hohlkastensteg), an denen kein Spannkanal geortet werden konnte, wurden in allen mit Endoskop inspizierten Bohrungen voll verpresste Hüllrohre vorgefunden. Als Beispiel sind im

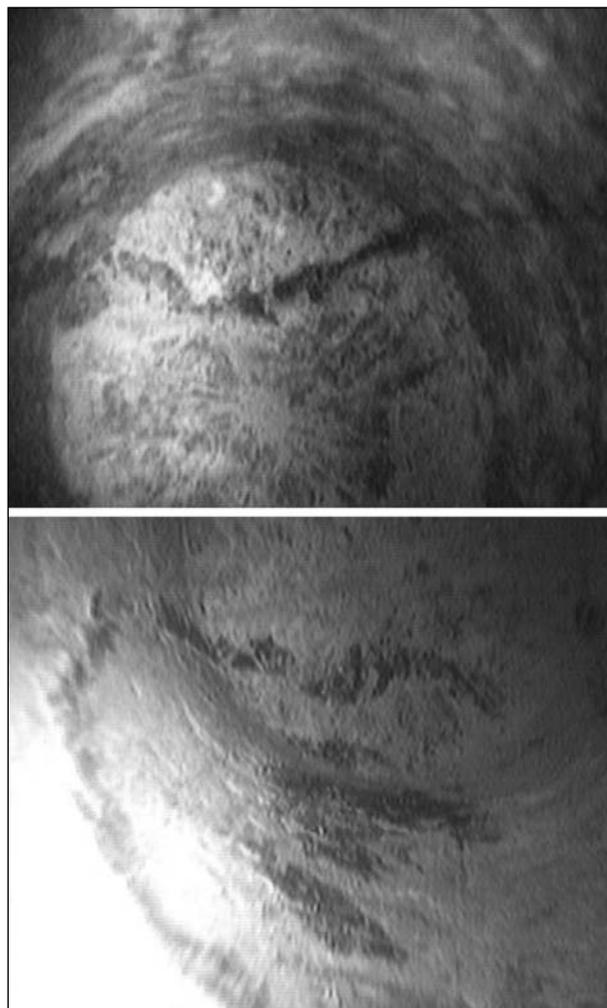


Bild 47: Videoaufnahmen der Sondierung E 3b (oben: Fahrbahnplatte) und Sondierung EW 2a (unten: Hohlkastensteg)

Bild 47 zwei Bilder der Videoaufnahmen aufgeführt. Die Sondierungen sind in Anlage 2, Tabelle 1 und 2 in [4], dokumentiert. Eine umfassendere Dokumentation der mit dem Videorekorder aufgezeichneten Sequenzen ist auf CD-ROM in [4] verfügbar.

Für die in der Fahrbahnplatte verwendeten Hüllrohre wurden an den Bohrkernen Durchmesser von 4,7-5,1 cm ermittelt. In den Hüllrohren sind jeweils sechs Spanndrähte enthalten. Als Beispiel ist im Bild 48 links die Ansicht des Spannkanals vom Bohrkern BK 3 dargestellt.

Die Entnahme der Bohrkern bestätigte die Angaben der Brückenbeschreibung und des Zulassungsbescheides zum verwendeten Spannverfahren Züblin (ed. Züblin, 1964).

Demnach wurden für die Quervorspannung Spannglieder des Typs ZS 55,5 (6N120) eingebaut. Die lichte Weite der gewellten Hüllrohre beträgt

45 mm. In den Hüllrohren selbst sind 6 gerippte, rechteckige Drähte aus vergütetem Neptunstahl mit einer Querschnittsfläche von 120 mm^2 enthalten.

Bei allen Bohrkernen über den Spanngliedern der Längsvorspannung sind jeweils 12 Spanndrähte im Hüllrohr, wie am Beispiel des Bohrkerns BK W3 im Bild 48 rechts zu erkennen, eingebaut.

Die Hüllrohrdurchmesser bei den Bohrkernen BK W3, BK W5 und BK W6 entsprechen den Angaben der für die Längsvorspannung verwendeten Spannglieder des Typs 12 N 120 (ed. Züblin, 1964). Danach beträgt die lichte Weite der gewellten Hüllrohre 65 mm. In den Hüllrohren verlaufen 12 ge-

rippte, rechteckige Drähte aus vergütetem Neptunstahl mit einer Querschnittsfläche von 120 mm^2 .

An der Entnahmestelle des Bohrkerns BK W1 wurde ein Hüllrohr mit größerem Durchmesser vorgefunden. Dieser liegt darin begründet, dass an die Koppelglieder Wellrohrübergangsstücke mit einer lichten Weite von 75 mm und einer Länge von 1 m angrenzen (ed. Züblin, 1964).

Die Bohrung BK W2 über dem Koppelglied des Spanngliedes Nr. 10 hat gezeigt, dass die tatsächliche Lage dieses Koppelgliedes mit der im Bauplan angezeigten Lage exakt übereinstimmt.

In Hinblick auf den Verpresszustand ist von der Vielzahl der Untersuchungsstellen nur eine Aus-

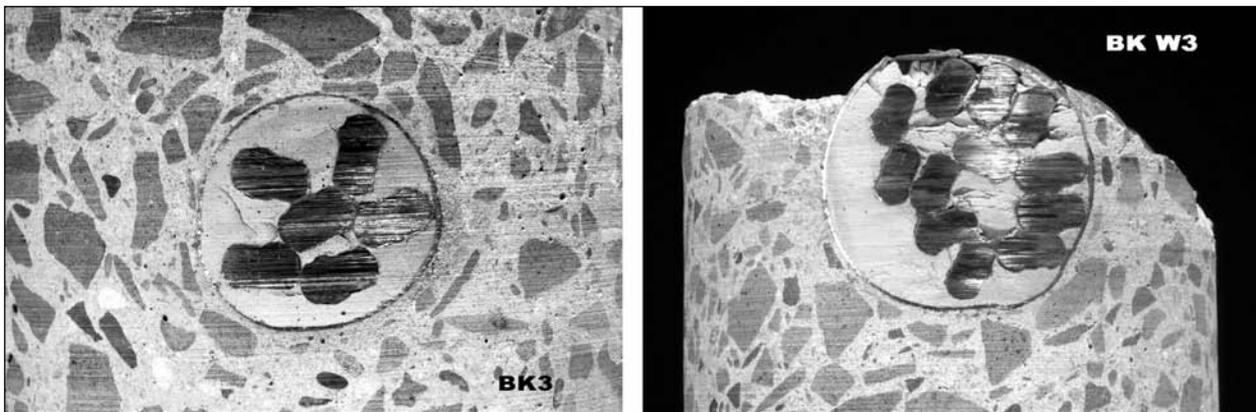


Bild 48: Spannkanaal Bohrkern BK 3 (Fahrbahnplatte) und im Bohrkern BK W3 (Hohlkastensteg)

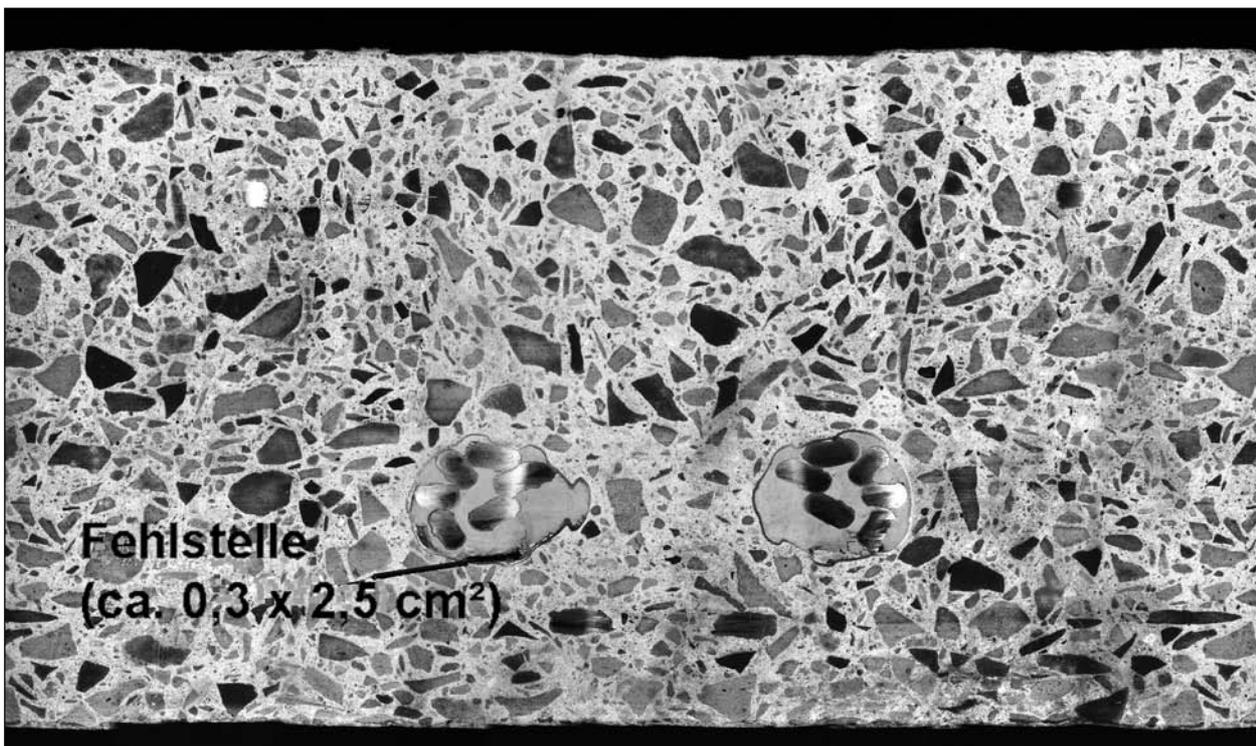


Bild 49: Abwicklung des Bohrkerns BK 35 (kleine Fehlstelle am linken Spannkanaalschnitt, Unterseite)

nahme aufzuführen. Wie im Bild 49 ersichtlich, wurde bei dem Bohrkern BK 35 am unteren Hüllrohrscheitel eine kleine Hohlstelle im Spannkanal festgestellt.

Die im Bild 49 an der linken Schnittfläche des Spannkansals sichtbare Hohlstelle ist ca. 25 mm breit und etwa 3 mm hoch. Die im Schnitt sichtbaren Spanndrähte werden vollständig von Verpressmörtel umhüllt.

Um festzustellen, wie diese Hohlstelle sich im Bohrkern fortsetzt, wurde der Bohrkern BK 35 computertomografisch durch die Fachgruppe I.4 „Nuklearanalytik“ der BAM untersucht. Zum Einsatz kam ein Universal-Tomograf mit einem Linearbeschleuniger (10 MeV, 15 Gy).

Als Ergebnis liegt ein dreidimensionaler Datensatz mit der für jedes Voxel gemessenen Absorptionsenergie vor. Daraus wiederum können, wie auch bei der Auswertung von Radar, Impact-Echo und Ultraschall-Echo, zweidimensionale Schnitte als Grauwertbilder wiedergegeben werden. Die Spanndrähte erscheinen aufgrund ihrer hohen Absorption gegenüber γ -Strahlen hell und die Luftlinse entsprechend ihres geringen Absorptionsverhaltens dunkel.

Im Horizontalschnitt in der Höhe der Luftlinse (Bild 50, oben links) und im Vertikalschnitt entlang des Spannkansals (Bild 50, oben rechts) zeigt sich deutlich, dass sich der kleine Hohlraum über die gesamte Breite des Bohrkernes erstreckt und im Wesentlichen die Profilierung des Hüllrohres ausfüllt.

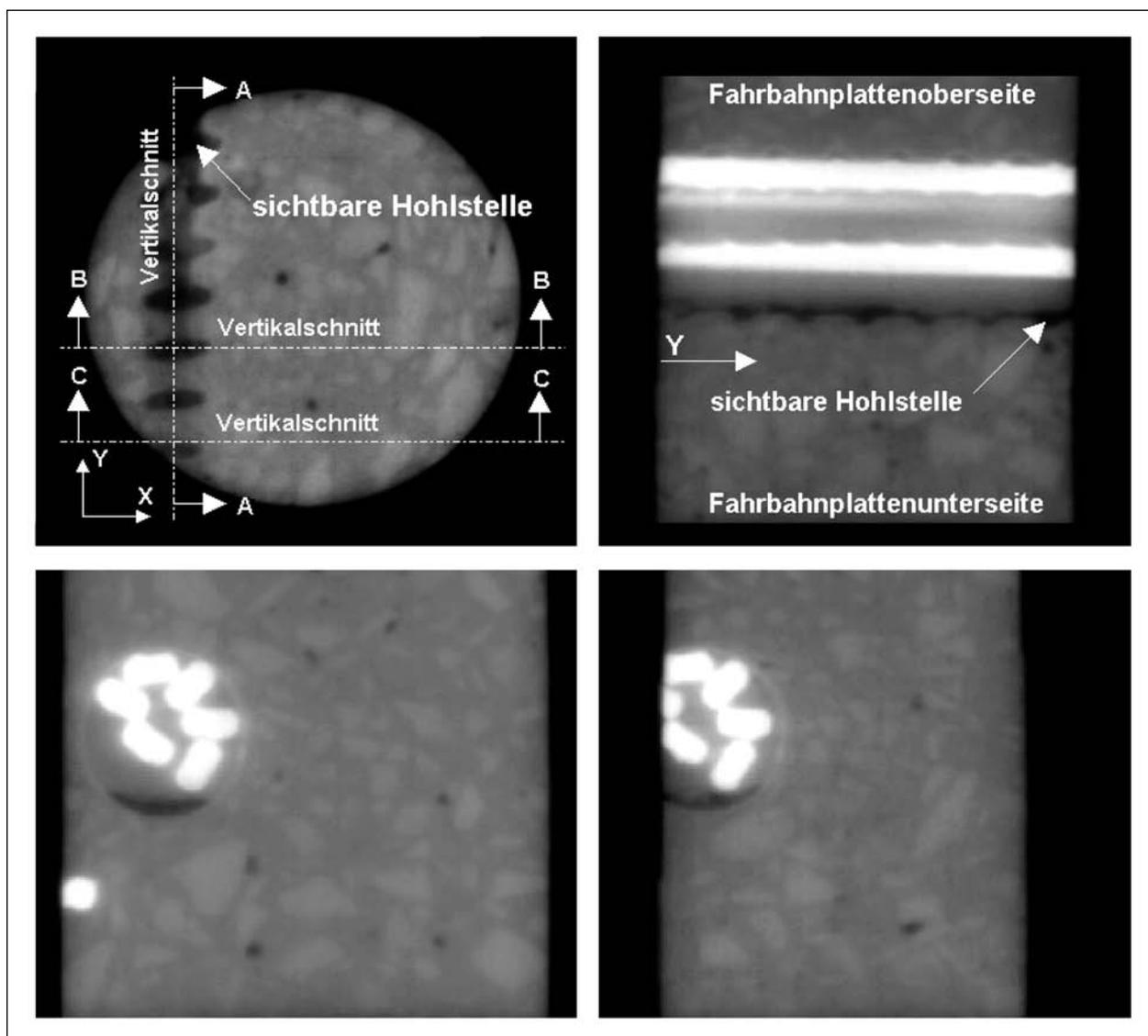


Bild 50: CT-Untersuchung am Bohrkern BK 35, oben links: Horizontalschnitt aus dem 3D-Bilddatensatz in Höhe der Luftlinse, oben rechts: Vertikalschnitt 1 aus dem 3D-Bilddatensatz entlang des Spannkansals, unten links: Vertikalschnitt 2, unten rechts: Vertikalschnitt 3

Bohrkern-Nr., Untersuchungsfläche	mittlere Rautiefe R_t [mm]
BK 18, Fahrbahnplattenoberseite (visuell grobe Oberfläche)	0,8
BK 18, Fahrbahnplattenunterseite (schalungsglatt)	0,1
BK 19/1, Fahrbahnplattenoberseite (visuell grobe Oberfläche)	0,7
BK 19/1, Fahrbahnplattenunterseite (schalungsglatt)	0,1
BK 23, Fahrbahnplattenoberseite (visuell grobe Oberfläche)	0,9
BK 33, Fahrbahnplattenoberseite (visuell mittelraue Oberfläche)	0,5
BK 35, Fahrbahnplattenoberseite (z. T. mit Epoxidharz beschichtet)	0,4

Tab. 6: Ermittlung der Rautiefe an ausgewählten Bohrkernen der Fahrbahnplatte

Zwei Vertikalschnitte quer zum Spannkanaal sind im Bild 50 unten abgebildet. Die über die Tiefe des Bohrkerns entnommenen Schnitte sind im Horizontalschnitt (Bild 50, links oben) gekennzeichnet. Mit Ausnahme des kleinen Bereiches im Vertikalschnitt 3 (Bild 50, unten rechts) sind die Spanndrähte auch im Bohrkerninneren von Einpressmörtel umgeben.

Außer an der Entnahmestelle des Bohrkerns BK 35 wurden die Spannkanaäle in einem sehr guten Verpresszustand vorgefunden. Weder an den Hüllrohren und dem Einpressmörtel noch an den Spanndrähten sind Schädigungen durch unsachgemäßes Verpressen oder durch Feuchte etc. zu erkennen.

Gemäß den entnommenen Bohrkernen wurden für die Ausbildung der schlaffen Bewehrung Bewehrungsstäbe mit Durchmessern von 10 mm und 14 mm verwendet. An den Bohrkernen der Fahrbahnplatte betragen die Betondeckung der oberen Bewehrung in der Regel 4-5 cm und die der unteren Bewehrung in der Regel 3-4 cm. Für die Betondeckung an der Innenseite des Hohlkastensteges wurden anhand der Bohrkernwerte von 2-5 cm ermittelt. Die Dicke der Fahrbahnplatte beträgt im Mittel 24,3 cm.

Die Breite des Hohlkastensteges nimmt im Bereich des Messfeldes HKS längs der Brückenachse ab. Bei Bohrkern BK W7 beträgt die Stegbreite 60,2 cm und bei Bohrkern BK W8 55,0 cm.

Die Bohrkernstärken und die Betondeckungen sowie Anmerkungen für die Verifizierung der ZfP-Bau-Ergebnisse sind für jeden einzelnen Bohrkern in Anlage 2, Tabelle 3 und 4, aufgeführt.

Wie sich bei den zerstörungsfreien Untersuchungen an der Brücke in Eichenzell zeigt, werden die Ergebnisse der beiden akustischen Verfahren merklich durch die Oberflächenbeschaffenheit der Messflächen beeinflusst. Sie wurden für die einzelnen Messflächen bereits verbal beschrieben.

Als absolute Werte für die Rauheit der Oberflächen wird hier die mittlere Rautiefe aufgeführt. Für die Rautiefenbestimmung an den entnommenen Bohrkernen wurde in Anlehnung an das Sandflächenverfahren nach DIN EN 1766 Sand (0,1 bis 0,4 mm Korngröße) auf den Bohrkernflächen so verteilt, dass die Vertiefungen gerade verfüllt waren. Aus dem resultierenden Sandvolumen und dem Bohrkerndurchmesser wurde die mittlere Rautiefe als Höhe der gedachten Zylinder berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6 aufgeführt.

3.7 Verifizierung der ZfP-Bau-Ergebnisse

3.7.1 Bestimmung der Bauteildicke

Zunächst wurde aus den Daten von Radar, Impact-Echo und Ultraschall-Echo die Dicke der Fahrbahnplatte bestimmt und mit den Dicken der Bohrkern verglichen.

Die Dickenbestimmung erfolgte anhand von B-Bildern. Im Folgenden ist dazu exemplarisch die Auswertung eines Radargramms einer Messspur, die längs zur Brückenachse auf der Fahrbahnplatte aufgenommen wurde, aufgezeigt.

Im Bild 51 ist der deutlich sichtbare Rückwandverlauf im Hohlkasteninneren und im Bereich der Vouten im Radargramm gekennzeichnet. Es wurden die Positionen der auf der Messspur liegenden Bohrkern sowie die entsprechenden Plattendicken ermittelt und im Radargramm eingetragen. Die Tiefenangaben in diesem Beispiel beruhen auf der Umrechnung der Laufzeiten mit einer Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r = 8,3$.

Aus den an der Fahrbahnplatte entnommenen Bohrkernen resultiert eine mittlere Dicke von 24,3 cm.

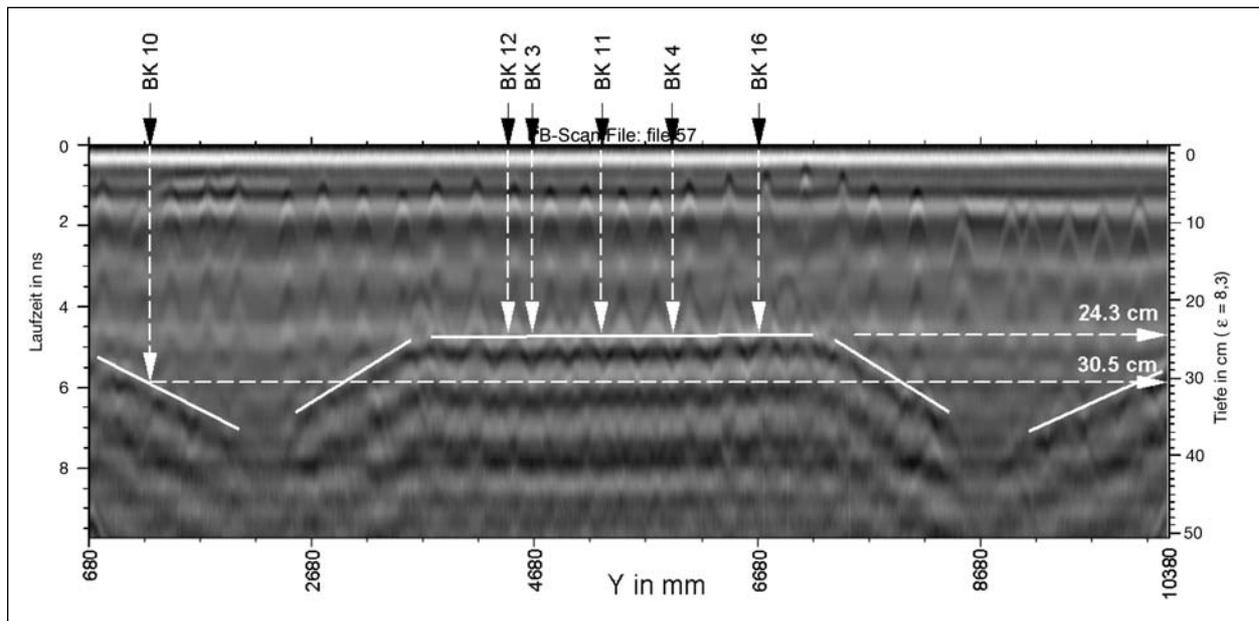


Bild 51: Radargramm aufgenommen entlang der y-Achse bei $x = 1,363$ m (1,5-GHz-Antenne, Polarisation senkrecht zur Messrichtung auf der Fahrbahnplatte)

Verfahren	Radar 1,5 GHz $\epsilon = 7,5$	Radar 1,5 GHz $\epsilon = 8,3$	Ultraschall- Echo $v = 2.500$ m/s	Ultraschall- Echo $v = 2.700$ m/s	Impact-Echo $v = 4.170$ m/s
Auswertemethode	B-Bild	B-Bild	3D-SAFT	3D-SAFT	FFT
Anzahl der Einzelwerte	25	25	21	21	13
Differenz in cm Mittel (Min/Max)	1,5 (0,7/2,3)	0,2 (-0,6/1,0)	-1,7 (-3,2/-0,4)	-0,1 (-1,0/1,5)	0,1 (-0,9/1,2)
Relative Differenz in % Mittel (Min/Max)	6,3 (2,8/9,9)	0,8 (-2,4/4,3)	-6,9 (-12,8/-1,7)	-0,4 (-4,2/6,4)	0,5 (-3,8/5,0)

Tab. 7: Verifizierung der mit den ZfPBau-Verfahren ermittelten Plattendicken vom Messfeld FBP

Für die Verifizierung der Dickenergebnisse wurden die Differenzen zwischen den mit den ZfPBau-Verfahren und den an den Bohrkernen ermittelten Dicken berechnet. Für das Messfeld auf der Fahrbahnplatte sind diese in Tabelle 7 aufgeführt. In Tabelle 8 sind die Abweichungen der mit Radar, Ultraschall-Echo und Impact-Echo im Messfeld an der Hohlkastendecke bestimmten Dicken dargestellt.

Die mit Impact-Echo ermittelten Dicken stimmen sehr gut mit den Bohrkernndicken überein. Auch bei Radar und Ultraschall-Echo sind nur geringe mittlere Abweichungen von maximal 1,9 cm bei Berücksichtigung der vor Ort bestimmten Parameter $\epsilon_r = 7,5$ bzw. $v = 2.500$ m/s zu verzeichnen.

Tendenziell sind jedoch die mit Radar ermittelten Dicken größer als die der Bohrkern und die Dicken bei Ultraschall-Echo kleiner als die der zerstörenden Untersuchung. Die sehr große Anzahl an Bohrkernen erlaubte hier eine präzise Nachkalibrierung

der Dielektrizitätszahl ϵ_r bei Radar und der Transversalwellengeschwindigkeit v bei Ultraschall-Echo. Die vom Material abhängigen Größen sind für die Umrechnung der Laufzeit- in eine Tiefen-Achse nötig.

Durch den Dickenvergleich anhand der Bohrkern wurden bei Radar die Dielektrizitätszahl $\epsilon_r = 8,3$ und bei Ultraschall-Echo eine Transversalwellengeschwindigkeit $v = 2.700$ m/s ermittelt.

Die Fahrbahnplattendicken, ermittelt am Bohrkern und aus den Radardaten, sind für jede einzelne Bohrkernposition im Messfeld auf der Fahrbahnplatte in der Anlage 3, Tabelle 1, aufgeführt. Die Tabelle 2 der Anlage 3 enthält die entsprechenden Werte für das Messfeld an der Hohlkastendecke.

Wie die Ergebnisse in Tabelle 7 und 8 zeigen, konnten die Abweichungen zwischen den mit Radar und Ultraschall-Echo ermittelten Dicken gegenüber den Bohrkernndicken nochmals verringert werden.

Verfahren	Radar 1,5 GHz $\epsilon = 7,5$	Radar 1,5 GHz $\epsilon = 8,3$	Ultraschall-Echo $v = 2.500$ m/s	Ultraschall-Echo $v = 2.700$ m/s	Impact-Echo $v = 4.170$ m/s
Auswertemethode	B-Bild	B-Bild	3D-SAFT	3D-SAFT	FFT
Anzahl der Einzelwerte	30	30	26	30	28
Differenz in cm Mittel (Min/Max)	0,9 (-1,2/2,0)	-0,2 (-1,2/0,8)	-1,9 (-2,6/-0,6)	-01 (-1,2/1,0)	-1,1 (-1,6/0,4)
Relative Differenz in % Mittel (Min/Max)	3,7 (-5,1/8,6)	-1,0 (-5,0/3,4)	-7,8 (-10,4/-2,6)	-0,4 (-5,6/4,3)	-1,1 (-6,9/1,7)

Tab. 8: Verifizierung der mit den ZfPBau-Verfahren ermittelten Plattendicken vom Messfeld HKD

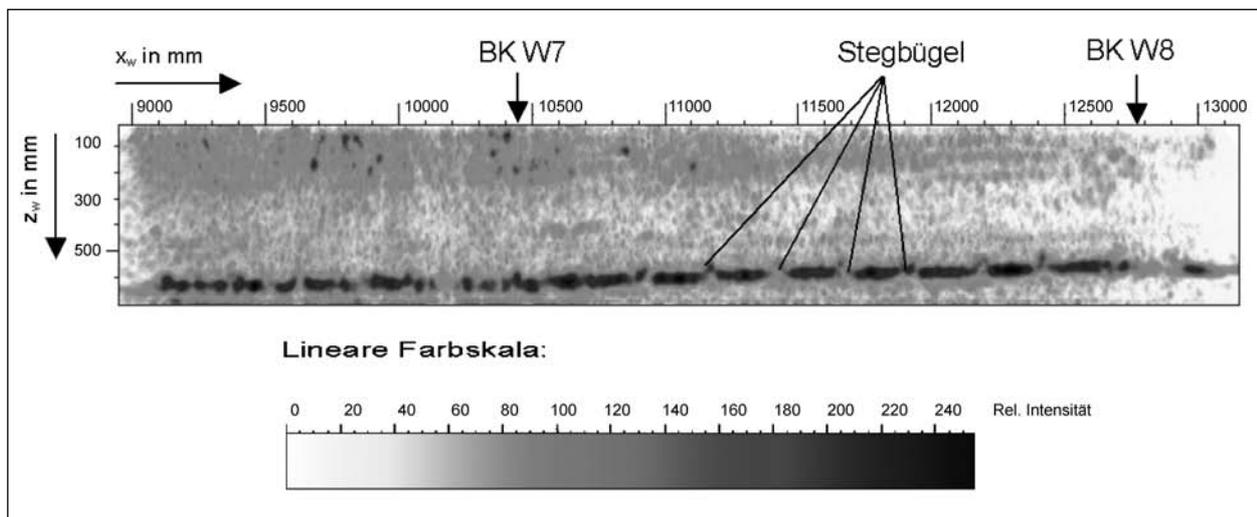


Bild 52: Ultraschall-Echo, Messfeld HKS: SAFT-B-Bild-Projektion über den gesamten Messbereich $y_w = 200-1.730$ mm, $v = 2.700$ m/s (horizontaler Schnitt durch den gevouteten Hohlkastensteg)

Bei dem Messfeld am Hohlkastensteg war es nur bei Ultraschall-Echo möglich, die SAFT-Ergebnisse anhand der Bohrkern BK W7 und BK W8 zu verifizieren (Bild 52). Durch die Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit auf $v = 2.700$ m/s stimmen auch hier die Ultraschall-Echo-Dicken besser mit den Breiten des Hohlkastensteges überein (Tabelle 9).

Die nachfolgenden Auswertungen der Radarmessungen an der Fahrbahnplatte basieren auf Radarogrammen und Tiefenschnitten, bei denen die Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r = 8,3$ berücksichtigt wurde. Durch die Erhöhung der Dielektrizitätszahl sind die Tiefen gegenüber den entsprechenden in den Kapiteln 3.3 und 3.4 genannten Tiefenangaben geringfügig kleiner. Die laterale Position der in den bisherigen Tiefenschnitten dargestellten Objekte zueinander wird dadurch nicht beeinflusst. Die Tiefenangaben für das Messfeld am Hohlkastensteg beruhen weiterhin auf einer Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r = 7,5$.

Zu den Messfeldern auf der Fahrbahnplatte und am Hohlkastensteg werden Ergebnisse der Daten-

Verfahren	Bohrkern	Ultraschall-Echo $v = 2.500$ m/s	Ultraschall-Echo $v = 2.700$ m/s
Auswertemethode		3D-SAFT	3D-SAFT
Dicke BK W7/BK W8	60,2/55,0	57,6/51,1	62,3/55,0
Differenz in cm Mittel (Min/Max)		-2,6/-3,9	2,1/0
Rel. Differenz in % Mittel (Min/Max)		-4,3/-7,1	3,5/0

Tab. 9: Verifizierung der mit Ultraschall-Echo ermittelten Stegbreite, Messfeld HKS

fusion vorgestellt und die Vorteile gegenüber nicht-fusionierter Daten genannt. Bei den Datenfusionen wurden jeweils die höheren Reflexionsamplituden der miteinander kombinierten Datensätze berücksichtigt.

Die Tiefenangaben der nachfolgenden Ultraschall-Echo-Auswertungen beruhen auf Umrechnungen der Laufzeit mit einer Transversalgeschwindigkeit von 2.700 m/s. Wie auch bei Radar ändert sich durch die höhere Schallgeschwindigkeit nicht die

Lage der in den C-Bildern bzw. -Projektionen dargestellten Objekte zueinander. Die ermittelten Tiefen sind gegenüber den entsprechenden in den Kapiteln 3.3 und 3.4 genannten Tiefenangaben geringfügig größer.

Die Verifizierung der Ultraschallergebnisse erfolgt im Wesentlichen anhand der Laufzeit-SAFT-rekonstruierten Daten. Zusätzlich wird Bezug auf die direkten Messdaten und auf FT-SAFT-rekonstruierte Daten genommen.

3.7.2 Ortung der schlaffen Bewehrung

Um die Bewehrung sowohl in Längs- als auch in Querrichtung gut detektieren zu können, wurden mit jeder verwendeten Radarantenne jeweils zwei Datensätze pro Messfeld aufgenommen. Die Aufnahme der Messspuren erfolgte dabei zum einen längs der Brückenachse mit einer Antennenpolarisation parallel zur Querbewehrung und zum anderen quer der Brückenachse mit einer Antennenpolarisation parallel zur Längsbewehrung.

Die Lage der schlaffen Bewehrung konnte dadurch mit Radar erwartungsgemäß sehr genau geortet werden. Angaben zum Durchmesser der Bewehrung sind jedoch mit diesem Verfahren nicht möglich.

Durch die großflächige Anwendung des Ultraschall-Echo-Verfahrens am Brückenbauwerk können auch hier zum Teil Informationen zur Lage der schlaffen Bewehrung gegeben werden. Mit Impact-Echo ist dies bisher nicht möglich. Jedoch traten wiederholt in Tiefenschnitten, die im Rahmen der Impact-Echo-Auswertung erzeugt wurden, wie auch bei anderen Impact-Echo-Messungen an großen stark bewehrten Untersuchungsobjekten regelmäßige Muster auf, die mit der Lage der schlaffen Bewehrung zusammenfallen. Diese sind gegenwärtig als neue Aspekte in die Forschungsarbeit integriert. Die Herkunft dieser Muster ist bisher aber nicht geklärt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse mit Radar und Ultraschall-Echo aufgeführt.

Radar

Nach den Radarergebnissen von den Messungen auf der Fahrbahnplatte ist die obere Regelbewehrung in dem untersuchten Plattenabschnitt sowohl in Längs- als auch in Querrichtung mit einem Achsabstand von ca. 33 cm eingebaut. In Brücken-

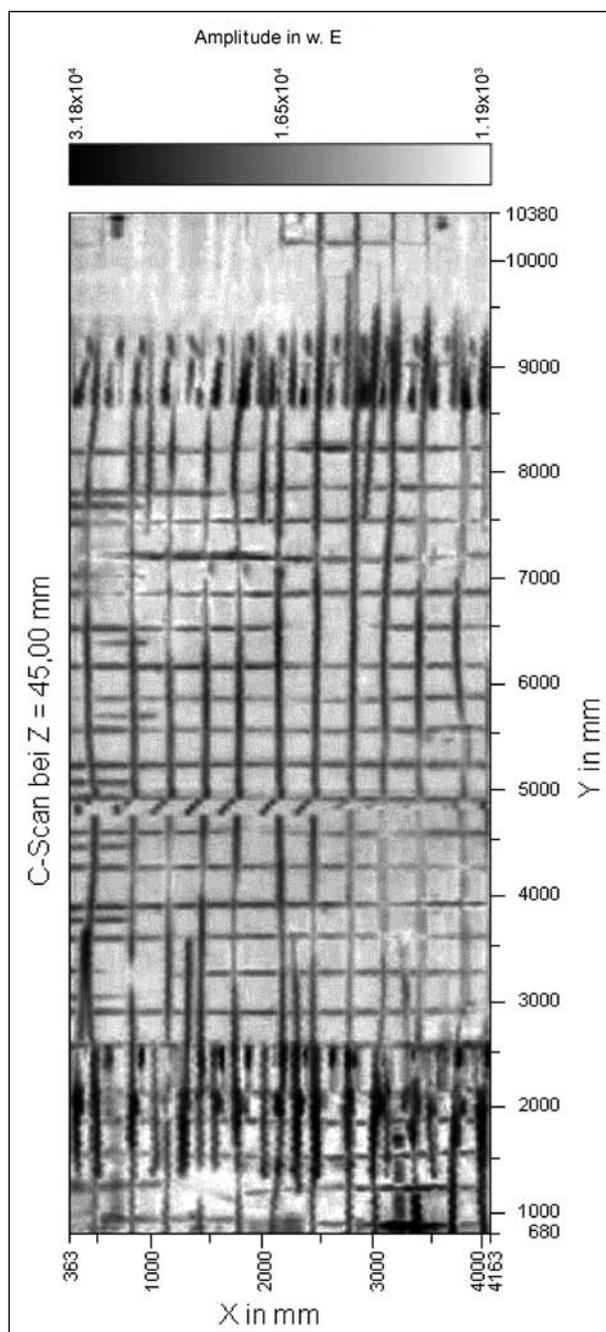


Bild 53: Radar, Messfeld FBP: SAFT-C-Bild des Fusionsdatensatzes in der Tiefe von 4,5 cm (obere Bewehrungslage)

längsrichtung verlaufen von $x = 363$ bis ca. 1.000 mm neun weitere Bewehrungsstäbe mit einem Achsabstand von 66 cm. Die Betondeckung beträgt 4 bis 8 cm.

Im Voutenbereich wurde zusätzliche Querbewehrung mit einem Achsabstand von 100 cm bei einer Betondeckung von 3,5-5,0 cm detektiert.

Einen guten Überblick über die obere Bewehrung gibt das in Bild 53 dargestellte C-Bild des Fusionsdatensatzes in der Tiefe von 4,5 cm.

Hier wurden die beiden auf der Fahrbahn aufgenommenen und anschließend SAFT-rekonstruierten Radardatensätze fusioniert. Der Vorteil der Fusion besteht darin, dass im Unterschied zu den beiden Radardatensätzen in dem Fusionsdatensatz die Reflexionssignale beider Polarisationsrichtungen berücksichtigt sind und somit im Ergebnis die Gesamtheit der detektierten Bewehrung abgebildet werden kann. Durch die Bündelung der Defraktionskurven in ihren Scheitelpunkten während der vorangestellten SAFT-Rekonstruktion ist außerdem eine detailliertere Beurteilung der Bewehrungslagen möglich. Wie Bild 53 zeigt, ist im Anschlussbereich an die Hohlkastenstege neben den zusätzlichen Bewehrungsstäben auch die oberflächennahe Bügelbewehrung der Stege zu erkennen. Zum Teil können dicht nebeneinander liegende Bewehrungsstäbe in y-Richtung nicht eindeutig voneinander getrennt werden. In diesen Bereichen stößt die 1,5-GHz-Radarantenne an die Grenzen ihrer lateralen Auflösung.

Im Unterschied zu der oberen Bewehrung konnte bei den Messungen auf der Fahrbahnplatte die schlaffe Bewehrung an der Plattenunterseite nicht vollflächig detektiert werden, da diese zum Teil durch darüberliegende Spannglieder und Bewehrung abgeschattet wird. Umfassende Beurteilungen der unteren Bewehrung waren durch die Messungen an der Hohlkastendecke möglich.

Über das gesamte Messfeld HKD verlaufen Bewehrungsstäbe längs der Brückenachse mit einem Achsabstand von 33 cm und einer Betondeckung von 3,0-5,5 cm sowie quer zur Brückenachse mit einem Abstand von 25 cm bei einer Betondeckung von 3,5-5,0 cm.

Die mit Radar in den beiden Messfeldern der Fahrbahnplatte geortete Lage der schlaffen Bewehrung stimmt mit den Angaben aus den zur Verfügung stehenden Bewehrungsplänen der Fuldabrücke Eichenzell überein. Zum Vergleich sind die Angaben der Pläne in Tabelle 10 aufgeführt.

Die mit Radar ermittelten Betondeckungen sind in der Regel größer als die in Tabelle 10 aufgeführte Betondeckung von 3 cm. Diese Tendenz spiegelt sich auch bei den an den entnommenen Bohrkernen ermittelten Betondeckungen wider. Gemäß Anlage 2, Tabelle 3, wurden an den Bohrkernen Betondeckungen an der Plattenoberseite von 3-7,5 cm und an der Unterseite der Platte Werte zwischen 2,7 cm und 5,5 cm gemessen.

Obere Bewehrung	<ul style="list-style-type: none"> - Betondeckung der schlaffen Bewehrung 3 cm, - quer zur Brückenachse: Ø 10 mm, e = 33 cm - in der Fahrbahnmitte längs zur Brückenachse: Ø 10 mm, e = 33 cm, zusätzlich von $x = 0-1.500$ mm: Ø 12 mm, e = 60 cm (insgesamt neun Stäbe), - Zusatzbewehrung im Voutenbereich: Ø = 10 mm, e = 100 cm
Untere Bewehrung	<ul style="list-style-type: none"> - Betondeckung der schlaffen Bewehrung 3 cm, - quer zur Brückenachse: Ø 10 mm, e = 25 cm - längs der Brückenachse: Ø 10 mm, e = 33 cm, - Zusatzbewehrung im Voutenbereich: Ø = 8 mm, e = 25 cm

Tab. 10: Schlaffe Bewehrung in der Fahrbahnplatte laut Bewehrungsplänen

Bei den Radarmessungen am Hohlkastensteg konnte die dem Hohlkasteninneren zugewandte Längsbewehrung deutlich geortet werden (Bild 38 in Kapitel 3.4.1.1). In Bild 54 ist exemplarisch das Radargramm einer vertikal verlaufenden Messspur dargestellt.

Deutlich sind neben den Spannkämen fünf Reflexionshyperbeln der Längsbewehrung sichtbar. Der Abstand der Hyperbelscheitelpunkte und damit der Bewehrungsachsabstand betragen ca. 33 cm, die Betondeckung 3,5-4,5 cm.

Die Stegbügelbewehrung (Bild 55) weist im Bereich von $x_w = 9.050-10.550$ mm im unteren Messfeldbereich einen Achsabstand von ca. 12 cm auf. Im oberen Feldbereich ist die Lage der einzelnen, eng nebeneinander liegenden Bewehrungsstäbe in den C-Bildern der Radarrohdaten nicht mehr eindeutig zu erkennen. Die Betondeckung beträgt ca. 3-5 cm.

Im Messfeldbereich von $x_w = 10.550-13.050$ mm sind die Abstände der vertikal angeordneten Bewehrungsstäbe größer. Im unteren Messfeldbereich beträgt der Achsabstand ca. 25 cm und im oberen Bereich ca. 12 cm. Es wurden Betondeckungen von 2,5-4 cm ermittelt (Bild 62 im Kapitel 3.7.2).

Die für die im Hohlkastensteg innen liegende schlaffe Bewehrung ermittelten Achsabstände decken sich mit den Angaben in den zur Verfügung gestellten Bauplänen. Letztere sind zum Vergleich in Tabelle 11 aufgeführt. Die mittels Radar bestimmten Betondeckungen korrelieren mit den für

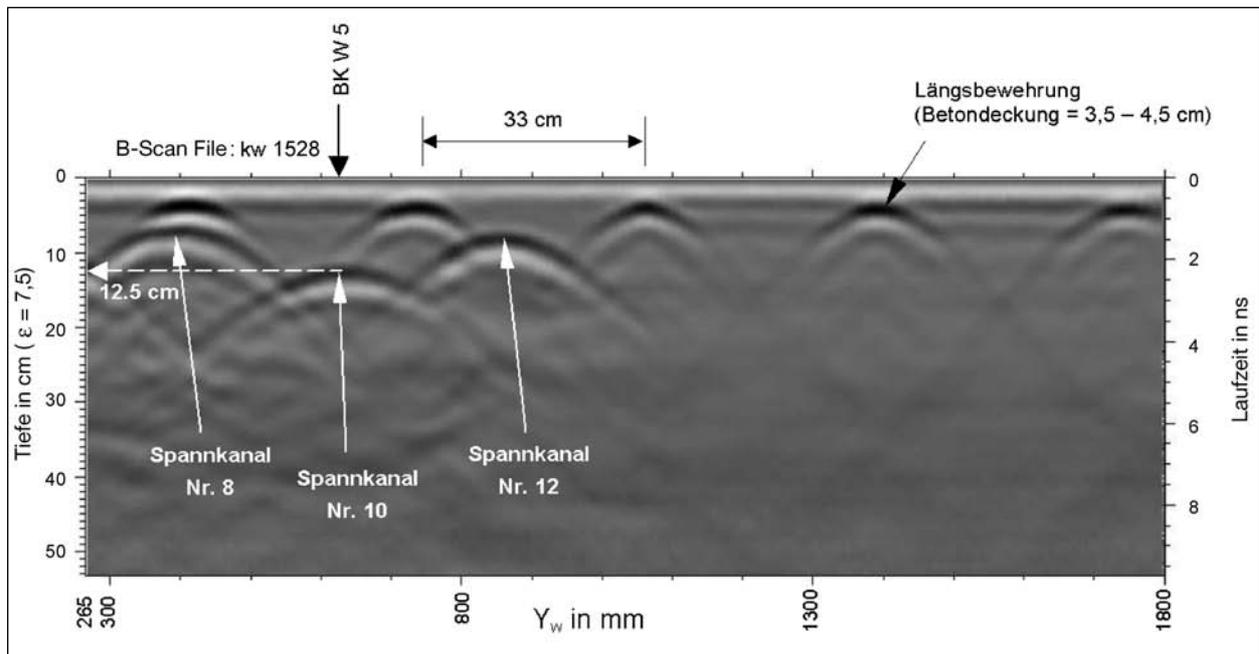


Bild 54: Radargramm entlang der y_w -Achse bei $x_w = 11,75$ m, aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne (Polarisation senkrecht zur Messrichtung) am Hohlkastensteg. Die Position des auf der Messspur liegenden Bohrkerns ist im Radargramm mit der Spannkanalüberdeckung gekennzeichnet

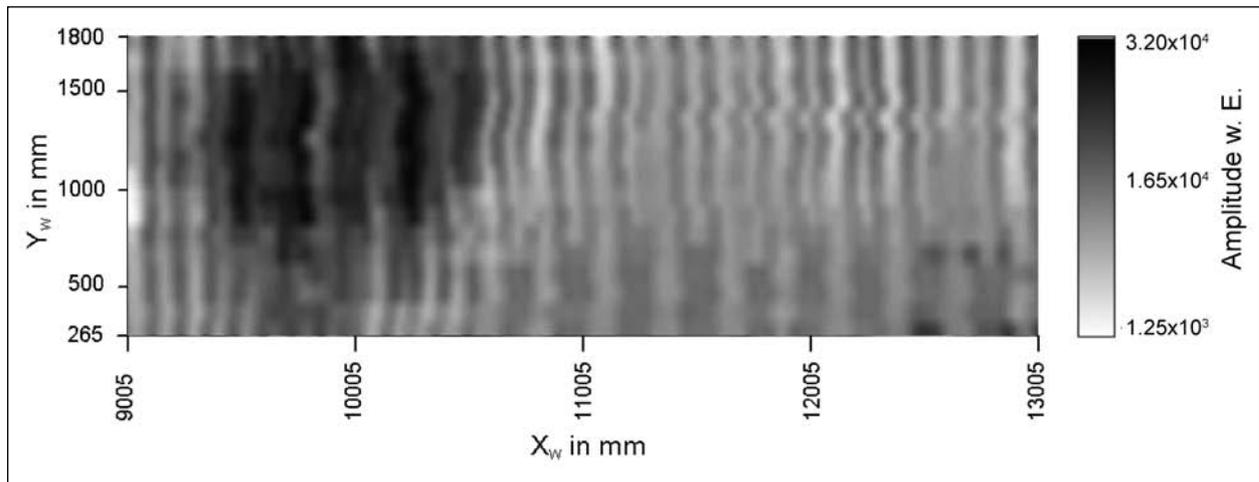


Bild 55: Radar, Tiefenschnitt in 5,2 cm Tiefe, Datensatz aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne mit senkrecht zur Messrichtung verlaufender Polarisationsrichtung am Hohlkastensteg (Messspuren parallel zur x_w -Achse)

- Betondeckung der schlaffen Bewehrung außen und innen 3 cm,
- Mindestbewehrung (Bügel) quer zur Brückenachse von $x = 9.050-10.550$ mm: $\varnothing = 10$ mm, $e = 25$ cm und $\varnothing = 14$ mm, $e = 12,5$ cm (eventuell 25 cm), von $x = 10.550-13.050$ mm: $\varnothing = 14$ mm, $e = 25$ cm,
- Mindestbewehrung längs der Brückenachse: $\varnothing = 10$ mm, $e = 33$ cm innen und außen
- Zusatzbewehrung

Tab. 11: Schlaffe Bewehrung im Hohlkastensteg laut Bewehrungsplänen

die entnommenen Bohrkerns in Anlage 2, Tabelle 4, aufgeführten Betondeckungen von 2-5 cm.

Die an der Außenseite des Hohlkastensteges liegende Bewehrung konnte weder mit der 1,5-GHz-Radarantenne noch mit der 900-MHz-Antenne geortet werden. Bei beiden Antennen ist die Absorption des Materials zu groß, um Reflexionssignale, im Falle des untersuchten Hohlkastensteges aus Messtiefen bis zu 61 cm empfangen zu können.

Ultraschall-Echo

Bei den Messungen auf der Fahrbahnplatte kann, vermutlich aufgrund der schwierigen Ankoppelbedingungen des Ultraschall-Messkopfes an die

Messoberfläche, nur die untere Bewehrung abschnittsweise lokalisiert werden. Die Messtiefe beträgt ca. 18 cm.

Im Ergebnis der Messungen an der Unterseite der Fahrbahnplatte (Messfeld HKD) werden sowohl die untere als auch die obere Bewehrungslage gut abgebildet. Wie in Bild 56, links, dargestellt, wurden die Stähle der oberen Bewehrung in Längs- und in Querrichtung im Abstand von ca. 30-35 cm verlegt. Unter Berücksichtigung einer mittleren Plattendicke von 24,3 cm resultiert aus der ermittelten Messtiefe für die obere Bewehrung eine Betondeckung von ca. 5,5 cm.

Für die der Messfläche zugewandten untere Bewehrung wurde eine Betondeckung von 5 cm ermittelt. In Bild 56, rechts, sind die untere Längsbewehrung und die diagonal zur Brückenlängsachse

angeordnete konstruktive Bewehrung zur Positionierung der Spannglieder zu erkennen.

Die Querbewehrung wird nicht deutlich abgebildet. Ein Grund dafür kann sein, dass die Ultraschallwandler des Arrays richtungsorientiert angeregt werden. So war der Prüfkopf bei den Messungen an der Hohlkastendecke so ausgerichtet, dass die Wellenausbreitung in x-Richtung, d. h. senkrecht zur Querbewehrung, geringer als parallel zur Querbewehrung erfolgte. Auch die an der Querbewehrung reflektierten Schallwellen sind von geringerer Intensität, sodass die Querstäbe im Ergebnis nicht deutlich abgebildet werden.

Bei den Untersuchungen am Hohlkastensteg ist der Ultraschall-Messkopf mit seiner Polarisation parallel zur y_w -Achse eingesetzt worden. Wie beim Messfeld HKD sind auch hier von der der Mess-

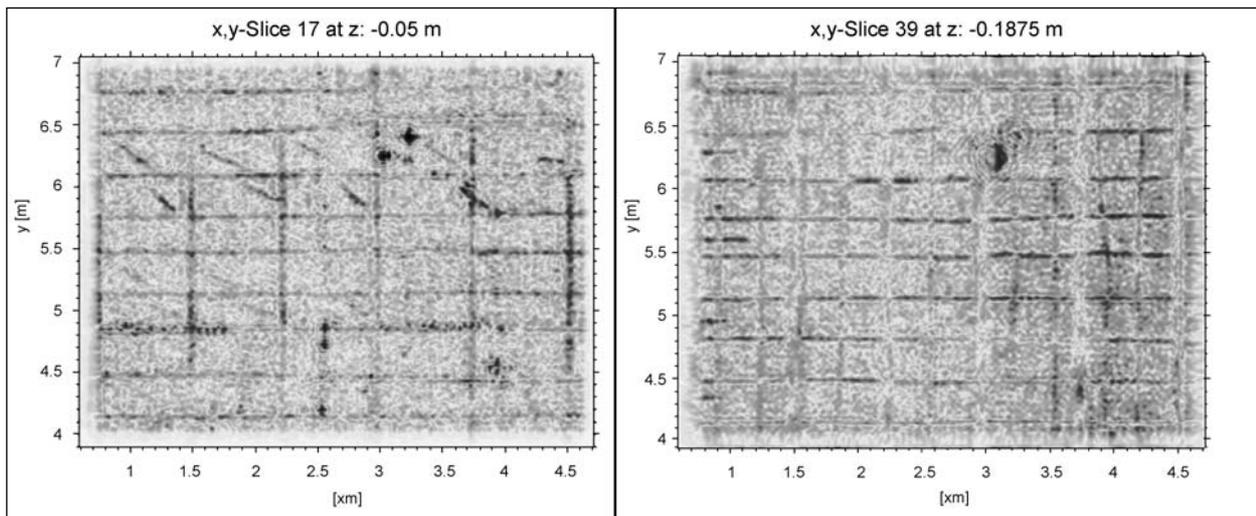


Bild 56: Ultraschall-Echo, HKD, Messfeld US1: links – FT-SAFT-C-Bild in der Messtiefe von 18,8 cm (obere Bewehrungslage), rechts – FT-SAFT-C-Bild in der Messtiefe von 5 cm (untere Bewehrungslage), Farbskala siehe Bild 52

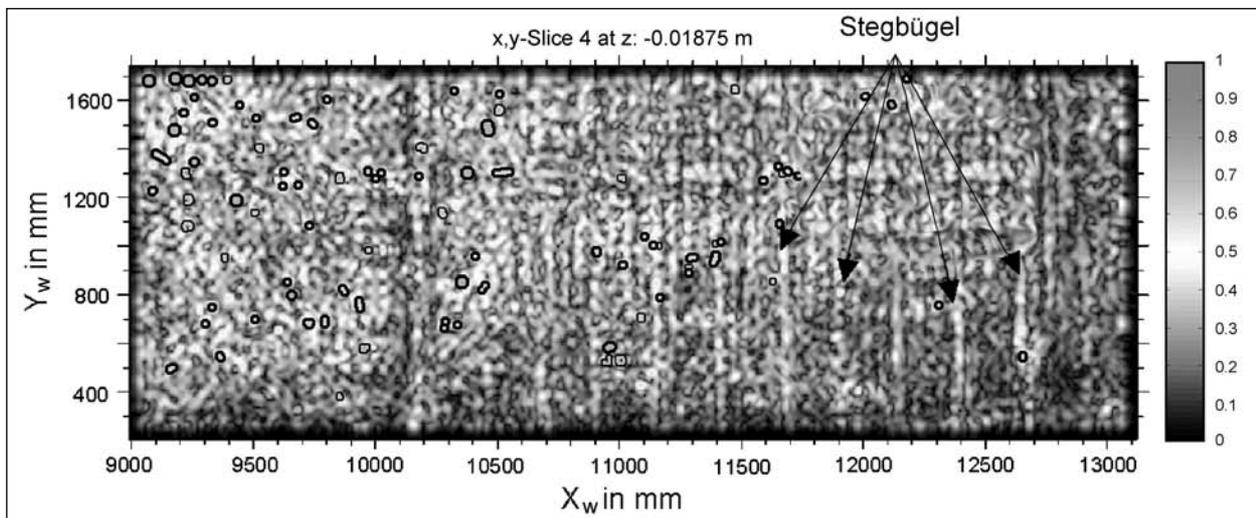


Bild 57: Ultraschall-Echo, Messfeld HKS: FT-SAFT-C-Bild in der Messtiefe von $z_w = 19$ mm

fläche zugewandten Bewehrung nur die Stähle parallel zur Polarisation zu erkennen (Bild 57). Wie das FT-SAFT-C-Bild in der Messtiefe von 2 cm zeigt, heben sich die Reflexionen der Stegbügel nur im Bereich ($x_w = 10.600$ mm bis 12.700 mm) mit größerem Bewehrungsabstand vom oberflächennahen Signalauschen ab.

Die an der Außenseite des Hohlkastensteges verlegten Stegbügel können in den Bereichen, wo sie und die Rückwand nicht von den innen liegenden Spannkämen abgeschattet sind, detektiert werden (Bild 52, Kapitel 3.7).

Nach Auswertung von SAFT-C-Bildern wurden im Messbereich $x_w = 9.000$ - 10.600 mm ein Stababstand von 13 cm und im untersuchten Bereich von $x_w = 10.600$ - 13.000 mm ein Abstand der Querstäbe von 25 cm ermittelt.

Fusion von Radar- und Ultraschall-Daten

Bei dem Messfeld am Hohlkastensteg konnten mit Radar die im Hohlkastensteg außen liegende Bewehrung und die Rückwand nicht detektiert werden. Mit Ultraschall-Echo sind, wie bereits vorgestellt, Informationen zur Dicke des Steges und zum Teil zur außen liegenden schlaffen Bewehrung gegeben. Mit dem Ziel, die Ergebnisse der beiden ZfPBau-Verfahren zusammenfassend darzustellen und dadurch ggf. noch detailliertere Informationen zu erhalten, wurden die mit der 1,5-GHz-Antenne aufgenommenen Radardatensätze SAFT-rekonstruiert und gemeinsam mit dem SAFT-rekonstruierten Ultraschall-Echo-Datensatz fusioniert.

Im Bild 58 ist ein C-Bild und im Bild 59 ein B-Bild dieses Fusionsdatensatzes abgebildet.

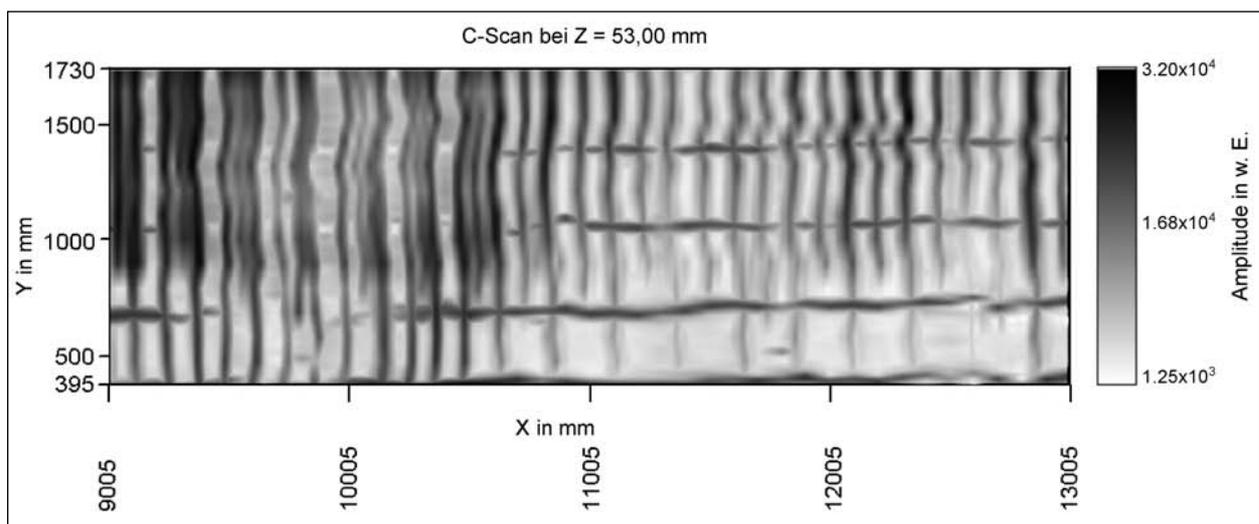


Bild 58: Datenfusion von zwei Radardatensätzen und einem Ultraschalldatensatz – C-Bild in der Messtiefe von 5,2 cm (Messfeld HKS)

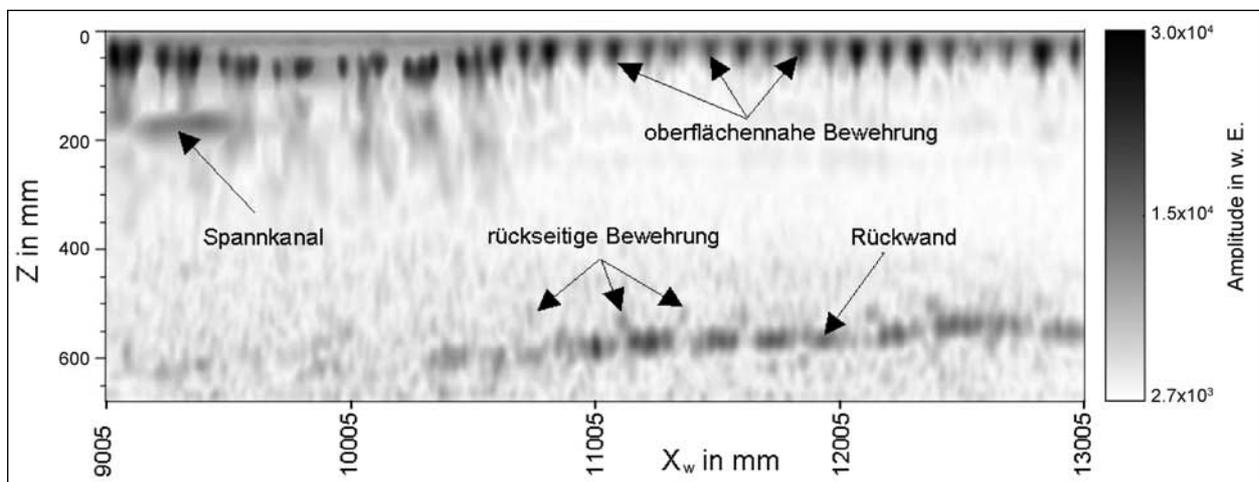


Bild 59: Datenfusion von zwei Radardatensätzen und einem Ultraschalldatensatz – B-Bild entlang der x_w -Achse bei $y = 1.175$ mm (Messfeld HKS)

In dem C-Bild wird der Vorteil der Fusion der beiden Radardatensätze wieder sehr deutlich. Bei der Fusion werden die Reflexionssignale beider Polarisationsrichtungen berücksichtigt, sodass in der betrachteten Tiefe von 5,2 cm sowohl die an der Steginnenseite verlegten Stegbügel als auch die Längsbewehrung deutlich zu erkennen sind. Im Unterschied dazu sind im Tiefenschnitt (Bild 55) nur die Stegbügel zu erkennen.

Wie auch bei der Auswertung der einzelnen Radardatensätze ist die Längsbewehrung mit einem Achsabstand von ca. 33 cm sowie die zwei Bereiche, in denen sich die Abstände der Stegbügel unterscheiden, zu erkennen. Durch die Datenfusion lassen sich aber auch im oberen Bereich des Messfeldes bei $x_W = 9.005 - 10.600$ mm einzelne, vertikal verlaufende Bewehrungsstäbe detektieren. Die im oberen Stegbereich zusätzlich im Abstand von 25 cm eingebauten Bügel enden im C-Bild bei $y_W = 650$ mm.

Im B-Bild (Bild 59) werden die Vorzüge der Datenkombination verschiedener Verfahren erkennbar. Auf der der Messfläche zugewandten Stegseite zeigt sich die mit Radar detektierte Bügelbewehrung und ein Spannkanal. Die mit Ultraschall-Echo geortete Rückwand und die rückseitige Bewehrung sind weniger deutlich sichtbar. Die Gesamteinschätzung des untersuchten Bauteils wird durch die komplexere Darstellung vereinfacht.

3.7.3 Ortung der Spannkanäle

Radar

Wie in den Kapiteln 3.3 und 3.4 beschrieben, konnten die Spannkanäle der Fahrbahnplatte und die im Hohlkastensteg innenliegenden Spannkanäle mit dem Radarverfahren eindeutig geortet werden.

Die mit Radar ermittelte Anordnung der Querspannglieder ist zusammen mit den Ergebnissen von Impact-Echo und Ultraschall-Echo in Tabelle 14 aufgeführt.

Die Betondeckungen wurden anhand der Radargramme für alle Positionen, an denen Bohrkern entnommen wurden, ermittelt und anschließend mit den an den Bohrkernen gemessenen Betondeckungen verglichen. Eine Übersicht gibt Anlage 3, Tabelle 1 und 2. In den meisten Positionen unterscheiden sich die mit den beiden Methoden bestimmten Werte nicht bzw. nur sehr geringfügig ($\pm 0,3$ cm).

In Bild 60 ist exemplarisch das Radargramm einer Messspur, die in y-Richtung entlang des Spannkanals Nr. 4 auf der Fahrbahnplatte verläuft, dargestellt. Der parabelförmige Verlauf des Spannkanals ist deutlich zu erkennen. Die Positionen der auf der Messspur liegenden Bohrkern (BK 18, BK 19 und BK 20) sind im Radargramm gekennzeichnet.

Es wurden Betondeckungen von 13,6 cm bei der Position des Bohrkernes BK 20 ($c = 13,5$ cm am

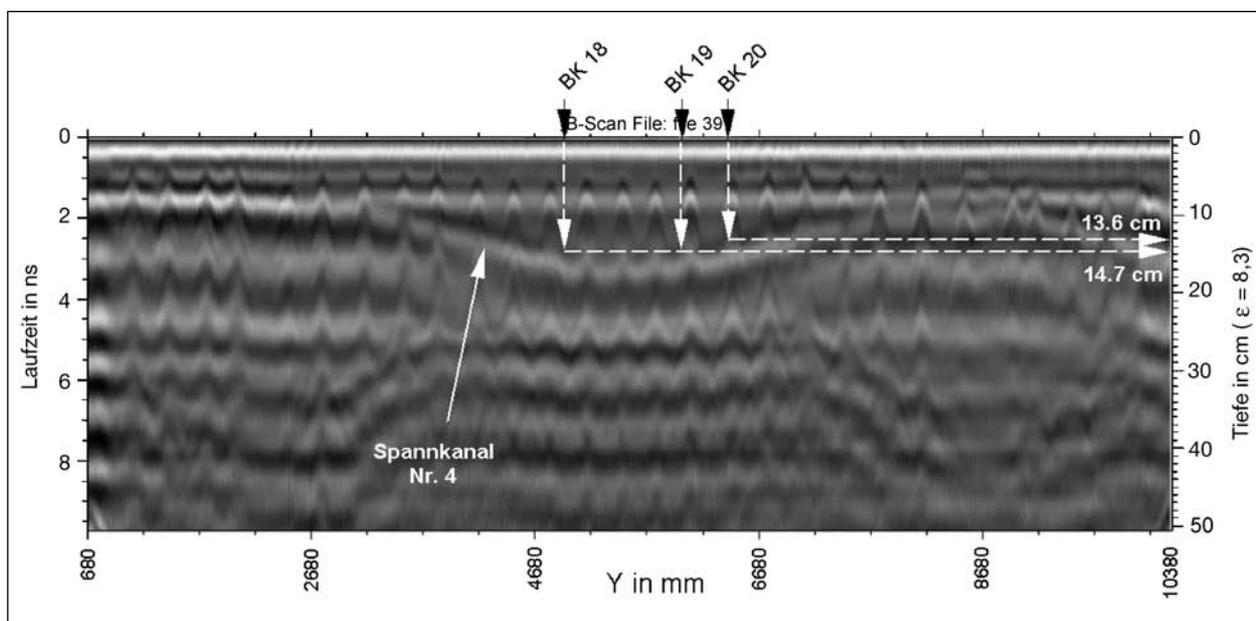


Bild 60: Radargramm entlang des Spannkanals Nr. 4 bei $x = 2.260$ mm, aufgenommen auf der Fahrbahnplatte (1,5-GHz-Antenne, Polarisation senkrecht zur Messrichtung)

Bohrkern) und von 14,7 cm an den Bohrkernepositionen BK 18 ($c = 14,3$ cm am Bohrkerne) und BK 19/1 ($c = 13,9$ cm am Bohrkerne) ermittelt.

Bild 61 zeigt das Radargramm einer Messspur entlang des Spannkanales Nr. 2, aufgenommen an der Hohlkastendecke. Neben den Reflexionshyperbeln der schlaffen Bewehrung ist deutlich der Spannkanalverlauf über die gesamte Spurlänge von 2.850 mm sichtbar. Die in diesem Bereich entnommenen Bohrkerne BK 2, BK 8 und BK 9 sind im Radargramm gekennzeichnet.

An der Position des Bohrkerne BK 9 ist die Differenz zwischen der mit Radar ermittelten Betondeckung und dem am Bohrkerne bestimmten Wert mit 0,3 cm am größten.

Als Beispiel für die Darstellung der Spannkanaäle mittels Datenfusion ist im Bild 63 ein C-Bild eines Fusionsdatensatzes in einer Tiefe von 12 cm dargestellt. Fusioniert wurden zwei SAFT-rekonstruierte Radardatensätze. Ein Datensatz wurde parallel

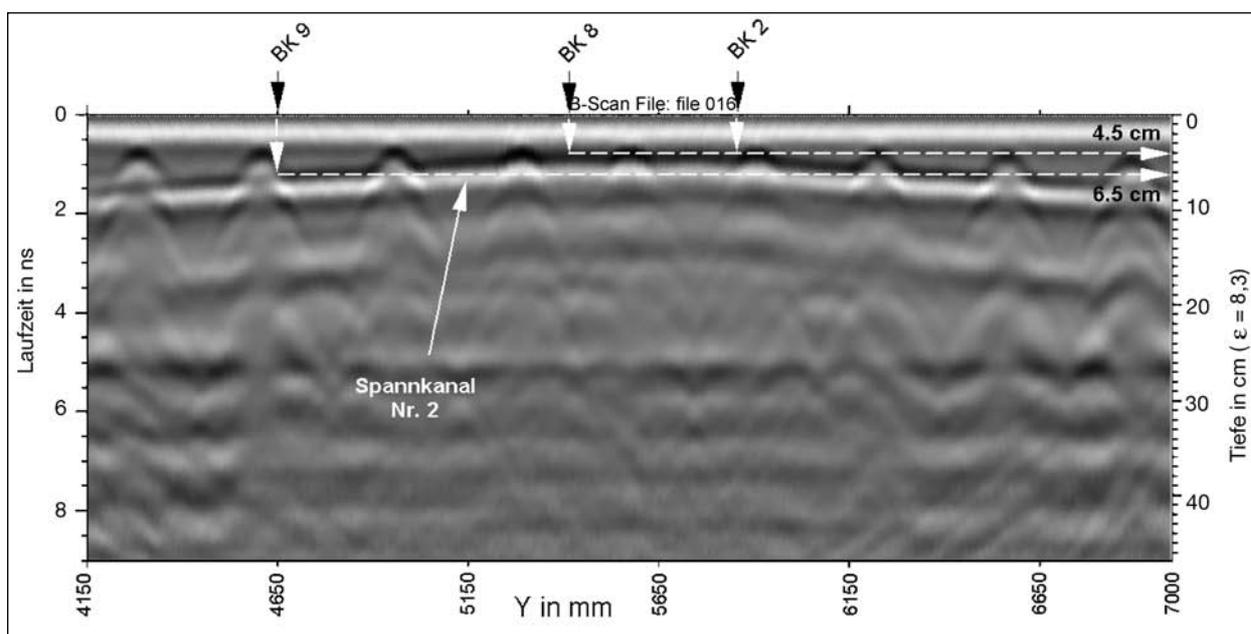


Bild 61: Radargramm entlang des Spannkanales Nr. 2 bei $x = 770$ mm, aufgenommen an der Hohlkastendecke (Polarisation senkrecht zur Messrichtung)

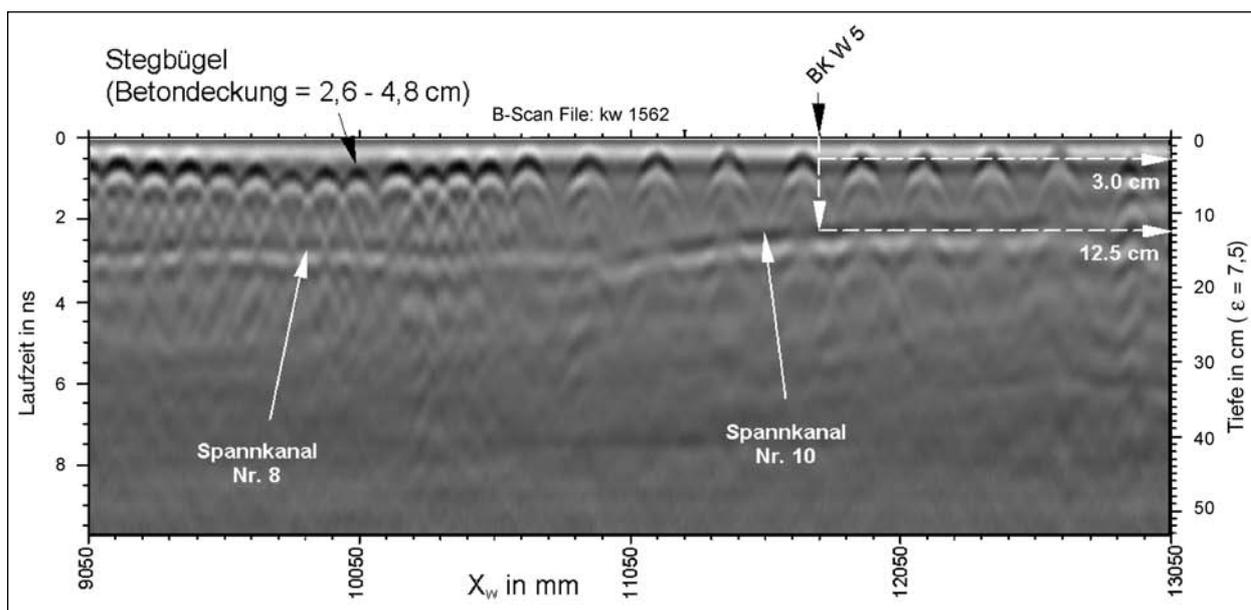


Bild 62: Radargramm bei $y_w = 600$ mm am Hohlkastesteg, aufgenommen mit der 1,5-GHz-Antenne (Polarisation senkrecht zur Messrichtung)

zur x-Achse und der andere parallel zur y-Achse aufgenommen.

Die Spannkanäle sind in dem C-Bild deutlich zu erkennen. Sie verlaufen nicht parallel zur Oberfläche. Im Bereich der Hohlkastenstege liegen sie dichter unter der Plattenoberseite als in der Fahrbahnmitte.

Aus diesem Grund können die Spannkanäle in der Tiefe von 12 cm nicht über die gesamte Breite der

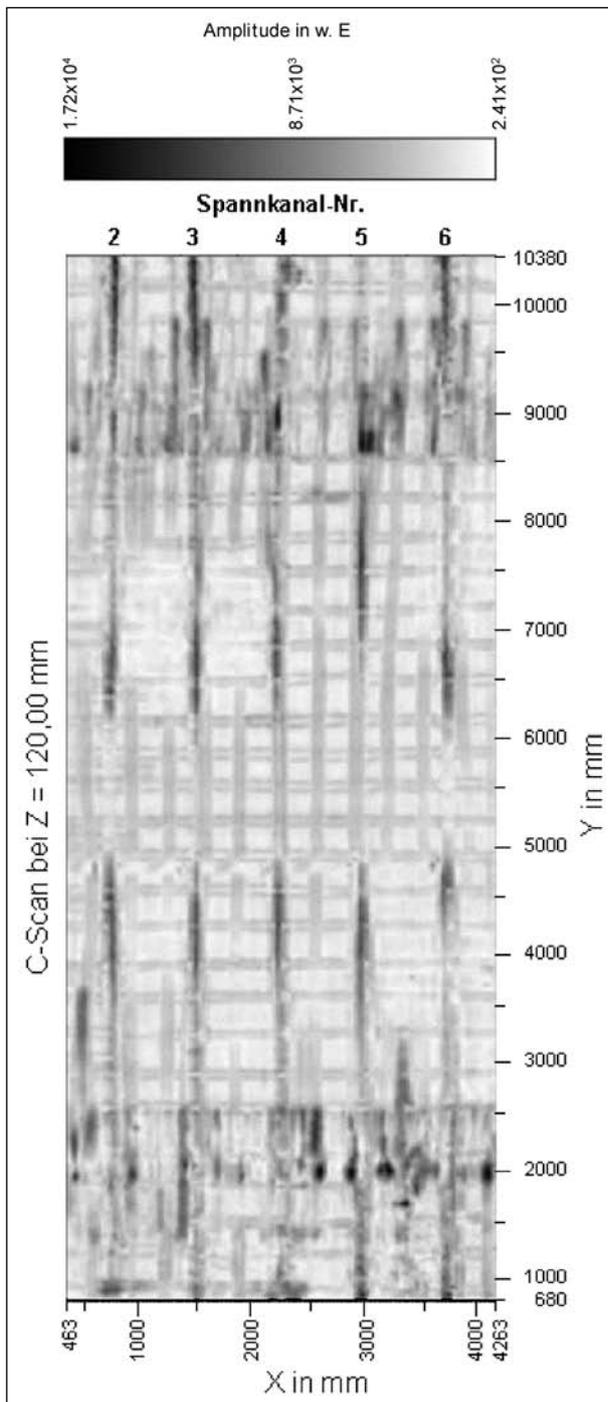


Bild 63: Radar: Spannkanäle und Bewehrungsmatten (FBP) – SAFT-C-Bild in der Tiefe von 12 cm

Fahrbahnplatte abgebildet werden, sondern werden in diesem C-Bild nahe der Fahrbahnmitte ($y_1 = 3.000-5.000$ mm und $y_2 = 6.000-8.000$ mm) angeschnitten. Die Reflexionssignale der Spannglieder sind zum Teil von den abklingenden reflektierten Signalen der oberflächennahen Bewehrung überlagert.

Ein typisches Radargramm zur Ortung der Längsvorspannung im Hohlkastensteg ist in Bild 54 (Kapitel 3.7.1) dargestellt. In diesem Bild sind neben der schlaffen Längsbewehrung deutlich die Reflexionshyperbeln der Spannkanäle Nr. 8, Nr. 10 und Nr. 12 sichtbar. Die hinteren Spannkanäle werden aufgrund der Abschattung nicht abgebildet.

Die Messspur des in Bild 62 dargestellten Radargramms verläuft im Unterschied zum Bild 54 am Hohlkastensteg in x_w -Richtung. Aufgrund der sich im Hohlkastensteg ändernden Höhenlage und Betondeckung der Spannkanäle werden die Spannkanäle nicht über die gesamte Radargrammlänge abgebildet. Für den Spannkanal Nr. 10 ergibt sich an der Position des Bohrkerns BK W5 ($c = 13,5$ cm am Bohrkern) eine Betondeckung von 12,5 cm.

In Tabelle 12 sind für alle im Radarmessfeld des Hohlkastensteges angeordneten Bohrkernpositionen die Betondeckungen der Spannkanäle, ermittelt am jeweiligen Bohrkern und aus den Radardaten, aufgeführt. Die anhand der Radardaten ermittelten Betondeckungen sind jeweils für zwei Dielektrizitätszahlen ($\epsilon_r = 8,3$ und $7,5$) angegeben.

Es zeigt sich, dass die mit einer Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r = 7,5$ ermittelten Betondeckungen eine ge-

Bohrkern-Nr.	Spannkanal-Nr.	Betondeckung des Spannkanals in cm				
		Bohrkern	Radar $\epsilon_r = 8,3$	Differenz	Radar $\epsilon_r = 7,5$	Differenz
BK W1	10	16,5	15,4	-1,1	16,3	-0,2
BK W3	10	13,5	12,5	-1,0	13,5	0,0
BK W5	10	13,5	11,9	-1,6	12,5	-1,0
BK W6	12	11,0	9,2	-1,8	10,0	-1,0

Tab. 12: Vergleich der Spannkanal-Betondeckung am Hohlkastensteg

ringere Abweichung zu den Bohrkernwerten aufweisen als die mit einer Dielektrizitätszahl von $\epsilon_r = 8,3$ ermittelten. Dies deutet darauf hin, dass im Vergleich zur Fahrbahnplatte der Beton des Hohlkastensteges geringfügig andere dielektrische Eigenschaften aufweist (z. B. Feuchte, Betonart).

Impact-Echo und Ultraschall-Echo

Die Untersuchungen der großen Messfelder in Eichenzell mit den beiden akustischen Verfahren bestätigen die Erkenntnisse der vergangenen Forschungsarbeiten. Für die Ortung der Spannkanäle im Bauteil wurden verschiedene Anzeigekriterien herangezogen.

Die Kriterien sind in Tabelle 13 aufgeführt. Die Ergebnisdarstellungen in den Kapiteln 3.3 und 3.4 zeigen, dass für die Interpretation der Messdaten im Einzelfall nur eine oder auch mehrere Kriterien relevant sein können.

Die für Ultraschall-Echo typische Abschattung veranschaulicht Bild 64. Über die gesamte parallel zu den Spannkanälen verlaufende Messfeldbreite sind die Reflexionsintensitäten der nicht abgeschatteten Rückwand zwischen Spannkanal Nr. 3 und Nr. 4 und die der abgeschatteten Rückwand unter Spannkanal Nr. 3 aufgetragen. Durch die Abschattung

Verfahren	Anzeigekriterium	Beispiel
Impact-Echo	(1) Verschiebung der Rückwand	Messfelder HKD, FBP
	(2) direkte Reflexion des Spannkanals	Messfeld HKD
	(1) direkte Reflexion des Spannkanals	Messfelder FBP, HKD, HKS
	(2) Abschattung der Bauteilrückwand	Messfelder FBP, HKD, HKS

Tab. 13: Anzeigekriterien für die Ortung der Spannkanäle im Bauteil

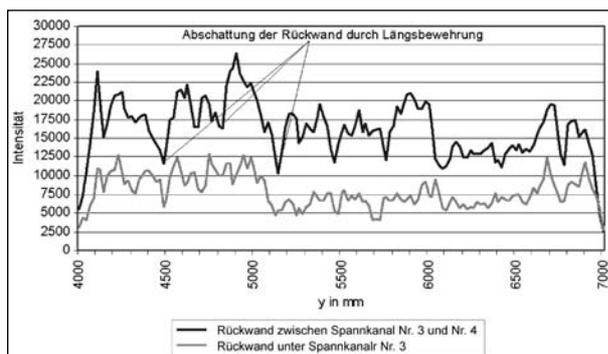


Bild 64: Ultraschall-Echo: Vergleich der Reflexionsintensitäten der Rückwand (Messfeld HKD)

zung verringern sich die Reflexionsintensitäten der Rückwand um etwa 6 dB.

Mit Impact-Echo wurde die horizontale Lage der Querspannglieder bei beiden Messungen an der Fahrbahnplatte anhand von Verschiebungen der Rückwandechos unterhalb der Spannkanäle (Kapitel 3.3.1.2 und Bild 65, unten) bestimmt.

Bei den Messungen an der Hohlkastendecke konnte die Lage der Spannglieder auch durch direkte Reflexionen der Spannkanäle ermittelt werden (Kapitel 3.3.2.2 und Bild 65, oben).

Der Verlauf der Spannkanäle parallel zu den jeweiligen Messflächen konnte unter Berücksichtigung dieser Anzeigekriterien mit Impact-Echo und Ultraschall-Echo zufrieden stellend bestimmt werden. In Tabelle 14 sind die für die Querspannglieder mit den ZfPBau-Verfahren ermittelten Lagekoordinaten entlang der für die Messfelder FBP und HKD gewählten x-Achse den Angaben der Baupläne und den Resultaten der zerstörenden Untersuchungen gegenübergestellt.

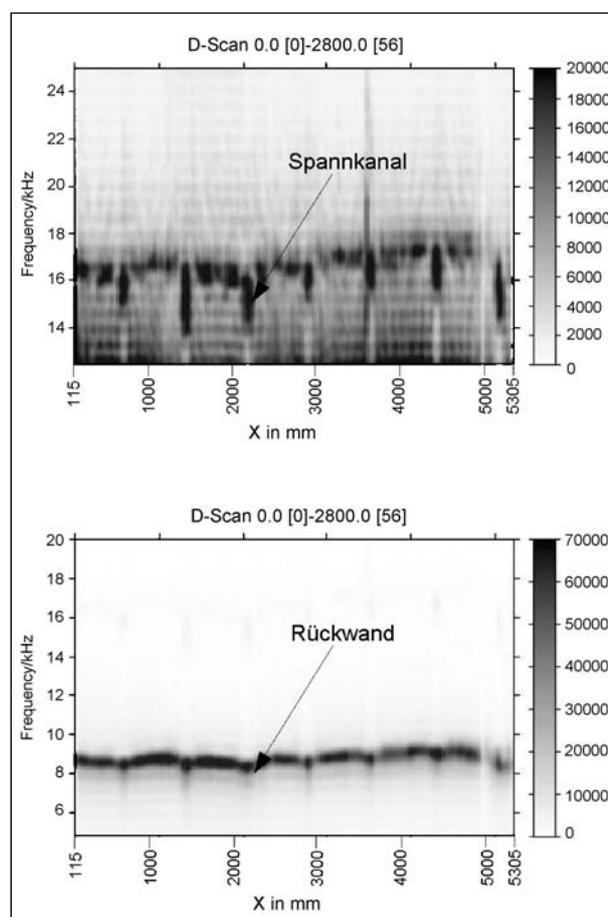


Bild 65: Darstellung eines Impact-Echogramms entlang der x-Achse bei $y = 6.945-4.145$ mm (Messfeld HKD)

Spannkanal Nr.	x-Koordinaten der Spannkanal-Scheitelpunkte in mm							
	Nach Bauplan	Nach Bohrkern- entnahme	Radar FBP	Impact-Echo FBP	Ultraschall FBP	Radar HKD	Impact-Echo HKD	Ultraschall HKD
1	0	-	-	-	-	-	-	-
2	750	720	750	720	720	770	750	745
3	1.500	1.480	1.500	1.480	1.449	1.540	1.510	1.502
4	2.250	2.205	2.250	2.200	2.165	2.270	2.230	2.232
5	3.000	2.945	2.970	2.960	2.921	3.020	2.980	2.965
6	3.750	3.700	3.720	3.680	3.682	3.770	3.730	3.747
7	4.500	4.480	-	-	-	4.540	4.510	4.510
8	5.250	5.215	-	-	-	5.280	5.260	5.230*
9	6.000	-	-	-	-	5.970	-	5.980*
10	6.750	6.738	-	-	-	6.780	-	6.780*
11	7.500	-	-	-	-	7.490	-	7.480*
12	8.250	-	-	-	-	8.250	-	8.230*
13	9.000	-	-	-	-	8.970	-	8.980*
14	9.750	-	-	-	-	9.730	-	-

Tab. 14: Horizontale Lage der Spannkanäle der Quervorspannung (Fahrbahnplatte)

Bei Radar wurden dazu die Radargramme, bei Impact-Echo die Tiefenschnitte (C-Bilder) und bei Ultraschall-Echo die SAFT-C-Projektionen bzw. bei den mit * gekennzeichneten Angaben die FT-SAFT-C-Bilder ausgewertet.

Die Abweichungen zwischen den durch die ZfP-Bau-Verfahren bestimmten x-Koordinaten und denen des Bauplans liegen in derselben Größenordnung wie die Unterschiede der Bohrkernkoordinaten zu den Angaben im Bauplan. An der Fulda-talbrücke Eichenzell wurden die Messfelder mit Zollstock und Maßband eingemessen. Sind bei zukünftigen Messungen höhere Genauigkeitsanforderungen gefordert, müssen die Messfelder durch eine exakte Vermessung auf das Bauwerk übertragen werden.

Im Unterschied zu Radar werden bei den akustischen Verfahren die Spannkanäle jedoch teilweise nicht bzw. nur gering reflektiert, sodass die Betondeckungen über den Spanngliedern nur punktuell bestimmt werden können.

Im Fall der Impact-Echo-Messungen auf der Fahrbahnplatte lassen sich keine Rückschlüsse auf die Betondeckung ableiten. Wie in LAUSCH, 2002), beschrieben, hängen die Rückwandverschiebungen maßgeblich von der außermittigen Lage der Spannkanäle im Bauteil und nicht allein von der Betondeckung über den Spannkanälen ab.

Für die Betrachtungen der direkten Reflexionsanzeigen der Spannkanäle im Messfeld HKD wurde der in SANSALONE, 1997, aufgeführte Ansatz he-

rangezogen. Nach SANSALONE, 1997 errechnet sich die Tiefe d eines Stahlreflektors aus den bekannten Größen, der Frequenz f und der Schallgeschwindigkeit v , unter Berücksichtigung eines Quotienten von 4 nach der Gleichung $d = v/(4f)$.

Im Falle des Messfeldes HKD wurde aus den an Bohrkernen gemessenen Betondeckungen bzw. Plattendicken, der mittleren Schallgeschwindigkeit von 4.170 m/s und den entsprechenden Messfrequenzen der Quotient ermittelt. Sie sind in Tabelle 15 aufgeführt. Der Quotient aus den Rückwand-Echos beträgt $2,0 \pm 0,04$ und entspricht den bisherigen Erfahrungen. Die aus den Reflexionsanzeigen der Spannkanäle errechneten Quotienten ergeben einen mittleren Wert von 4,0. Würde man diesen Wert 4,0 wiederum als konstant betrachten und aus den Messfrequenzen die Betondeckungen berechnen, weichen diese zu stark von den an den Bohrkernen gemessenen Werten ab. Werden die in Tabelle 15 ermittelten Quotienten über die gemessenen Betondeckungen aufgetragen, wie im Diagramm Bild 66, zeigt sich, dass der Quotient bei zunehmender Betondeckung über den Spanndräh-ten kleiner wird.

Die vorliegenden Ausführungen erlauben derzeit keine sicheren Angaben der Betondeckungen über den Spannkanälen aufgrund direkter Reflexionsanzeigen. Die in diesem Falle erhaltenen Erkenntnisse werden jedoch in der laufenden Forschungsarbeit zur Anwendung von Impact-Echo, z. B. im Rahmen des DFG-Forschungsvorhabens FOR 384, berücksichtigt.

Spannkanal-Nr.	Bohrkern-Nr.	Betondicke am Bohrern	Betondeckung am Bohrern	Frequenz (Impact-Echo)		Quotient Rückwand	Quotient Spannkanal
		[mm]	Stahl (mm)	Rückwand	Spannkanal		
		[kHz]					
2	1	245	65	8,57	16,01	2,0	4,0
	2	243	66	8,60	15,80	2,0	4,0
	8	245	58	8,61	16,09	2,0	4,5
	9	245	68	8,53	15,93	2,0	3,8
3	3	250	66	8,52	15,85	2,0	4,0
	11	245	63	8,48	14,98	2,0	4,4
	12	245	73	8,48	15,89	2,0	3,6
	13	250	63	8,53	15,93	2,0	4,2
	14	245	60	8,51	14,87	2,0	4,7
	15	245	61	8,55	15,22	2,0	4,5
4	16	240	85	8,77	16,46	2,0	3,0
	17	250	65	7,95	14,94	2,1	4,3
	18	250	70	8,34	14,91	2,0	4,0
	19/1	250	72	8,51	15,98	2,0	3,6
5	20	250	75	8,56	15,96	1,9	3,5
6	21	240	71	8,61	16,16	2,0	3,6
	27	234	74	8,70	16,27	2,0	3,5
7	28	237	53	8,94	16,86	2,0	4,7
	30	231	83	8,99	16,58	2,0	3,0
8	31/1	234	61	8,99	16,74	2,0	4,1
	32	242	66	8,84	15,06	1,9	4,2
	33	233	66	9,31	16,08	1,9	3,9

Tab. 15: Impact-Echo: Bestimmung des Quotienten mit einer Schallgeschwindigkeit von $v = 4.170$ m/s

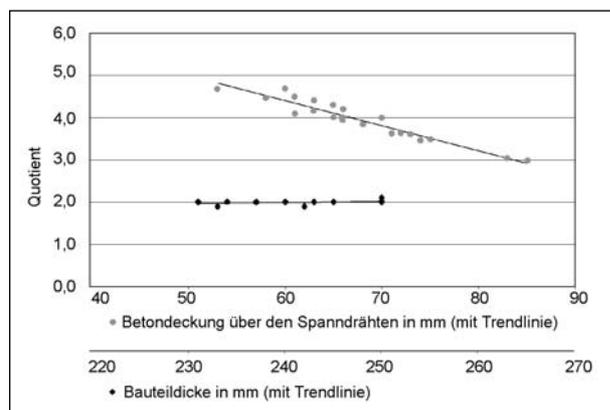


Bild 66: Darstellung des Quotienten über der Betondeckung über den Spanndrähten bzw. über der Plattendicke, $v = 4.170$ m/s

Bei Ultraschall-Echo können die Betondeckungen über den Spannkanälen durch die Auswertung hintereinander folgender SAFT-C-Bilder oder durch die Betrachtung von SAFT-B-Bildern senkrecht zu den Spannkanälen abgeschätzt werden. Eine SAFT-B-Projektion und ein FT-SAFT-Bild längs zur Brückenachse sind im Bild 67 abgebildet. Bei beiden Darstellungen handelt es sich um Schnitte durch die Fahrbahnplatte an den Entnahmestellen

der Bohrkerne BK 14 und BK 18 (Messfeld HKD). Es ist zu erkennen, dass bei den Messungen die Schallwellen an oder auch in den Spanngliedern in unterschiedlicher Intensität reflektiert werden und die Bauteilrückwand durch vorliegende Spannglieder abgeschattet wird. Ist die Reflexionsintensität des Spannkanals, wie in den Darstellungen in Bild 67 beim Spannkanal Nr. 6, nicht größer als das Kornrauschen des umgebenden Betongefüges, kann die Betondeckung nicht bestimmt werden. Ist die Intensität höher, wie im Bild 62 bei den Spannkanälen Nr. 3 und Nr. 4, ist es möglich, die Betondeckung der Spannkanäle anzugeben.

In den Darstellungen im Bild 67 sind Reflexionen der Spannkanäle ab einer Messtiefe von ca. 5 cm zu erkennen. Bei Bohrern BK 14 wurde eine Betondeckung von 5,0 cm und bei Bohrern BK 18 von 5,3 cm gemessen.

In den SAFT-B-Bildern entlang eines Spannkanals, wie in Bild 68 oben und Mitte für den Spannkanal Nr. 3 dargestellt, sind die Reflexionen des Spannkanals sehr gering und unterliegen außerdem Intensitätsschwankungen. Entgegen den Erwartungen ist der parabelförmige Verlauf des Spannka-

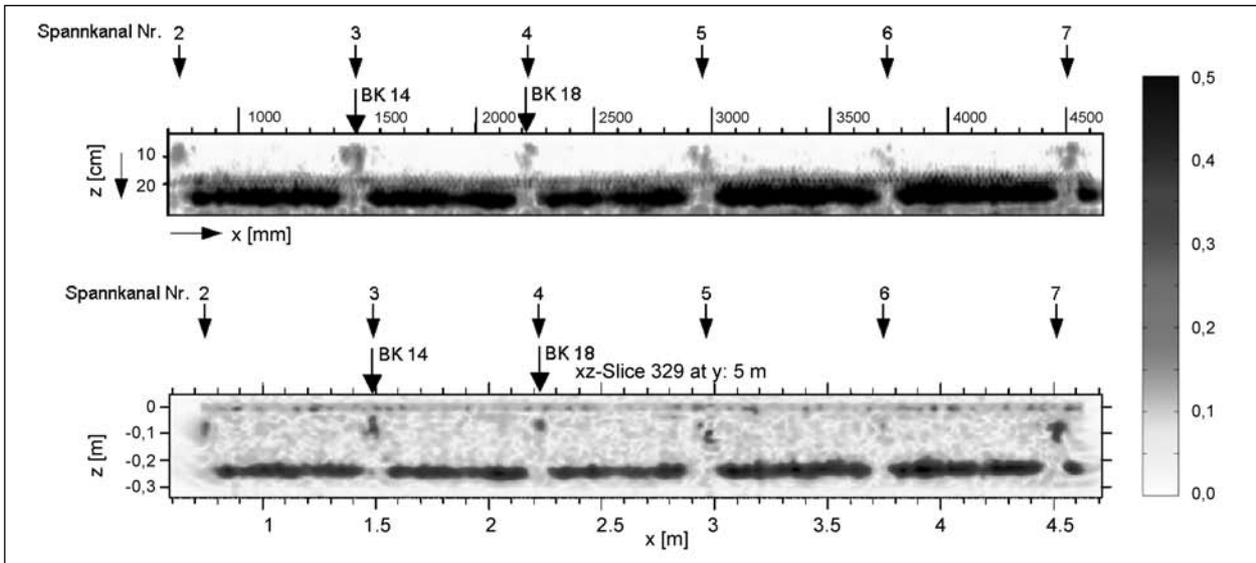


Bild 67: Ultraschall-Echo (HKD): oben: SAFT-B-Projektion von $y = 4.900 \text{ mm}$ - 5.200 mm (HKD), unten: FT-SAFT-B-Bild bei $y = 5.000 \text{ mm}$

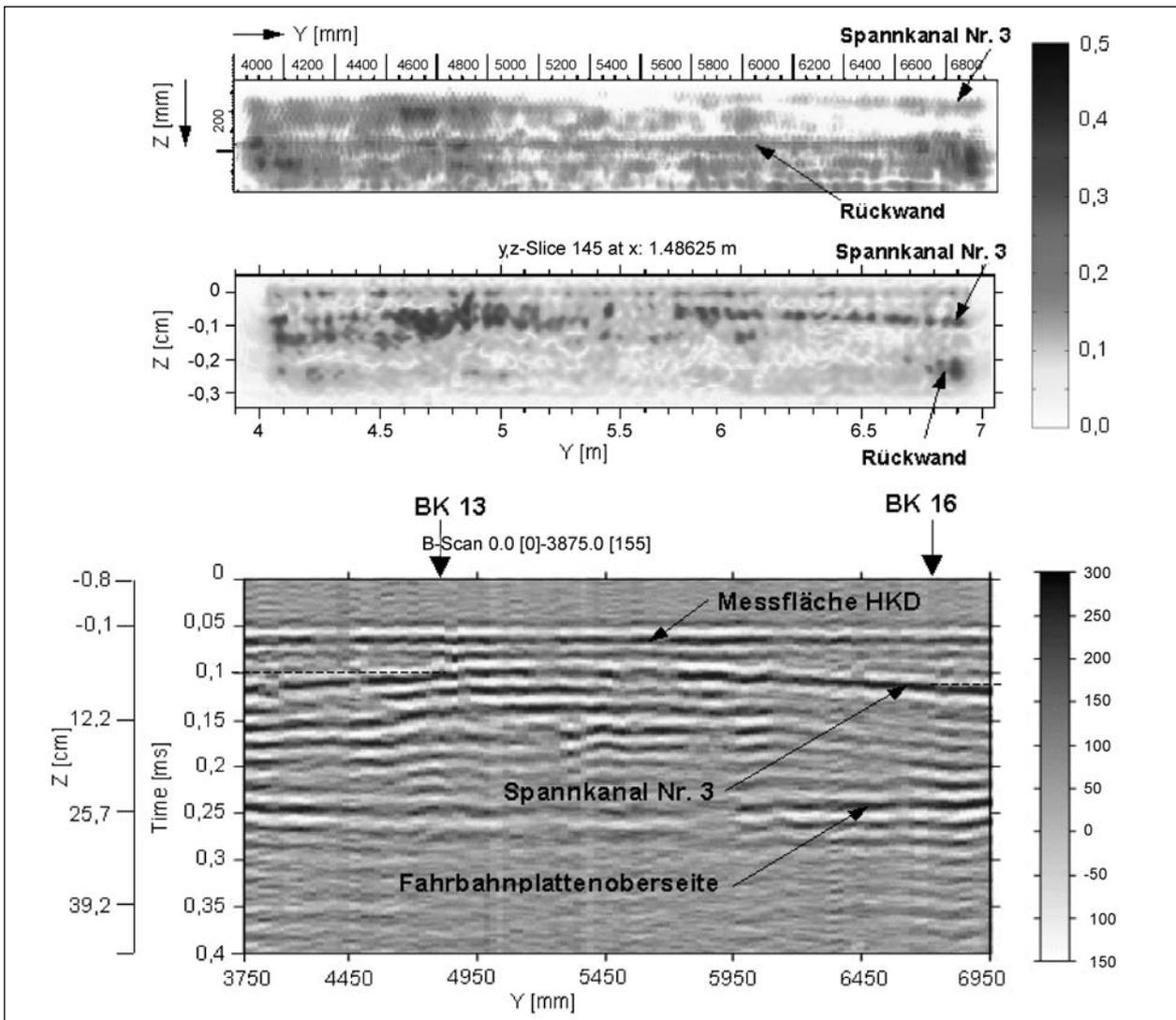


Bild 68: Ultraschall-Echo, Spannkanal Nr. 3 (HKD): oben: SAFT-B-Projektion von $x = 1.430 \text{ mm}$ - 1.520 mm , Mitte: FT-SAFT-B-Bild bei $x = 1.486 \text{ mm}$, unten: B-Bild bei $x = 1.480 \text{ mm}$

nals bei beiden SAFT-Rekonstruktionen nicht zu erkennen, dafür jedoch im B-Bild, das aus den Rohdaten erzeugt wurde (Bild 68, unten).

Aus den dem B-Bild entnommenen Laufzeiten an den Entnahmepositionen der Bohrkern BK 13 (Betondeckung $c = 4,6$ cm am Bohrkern) und BK 16 (Betondeckung $c = 7,4$ cm am Bohrkern) resultieren Werte für die Betondeckung über dem Spannkanal von 5,4 cm bei Bohrkern BK 13 und von 7,4 cm bei Bohrkern BK 16.

3.7.4 Zustandsbeschreibung der Spannkanäle – Diskussion der Impact-Echo- und der Ultraschall-Echo-Ergebnisse

Für die Zustandsbeurteilung von Spannkanälen mit Impact-Echo und Ultraschall-Echo wurden Kriterien herangezogen, die auf Versuche an Probekörpern und an realen Bauwerken beruhen.

Beim Impact-Echo-Verfahren wurde für die Zustandsanalyse, soweit nachweisbar, die Charakteristik der direkten Spannkanälechos und der von diesen Spannkanälen in ihrer Lage und Intensität beeinflussten Rückwändechos angewendet (SAN-SALONE, 1997; LAUSCH, 2002; KRIEGER, 2002; WIGGENHAUSER, 2003).

Bei Untersuchungen mit Ultraschall-Echo wird erwartet, dass in unvollständig verfüllten Bereichen die Reflexionsintensität deutlich größer als in Hüllrohren mit gutem Verpresszustand ist. Jüngste Forschungsarbeiten mit dem im vorliegenden Vorhaben angewendeten Transversalwellen-Messkopf zeigen zwei Merkmale zur Identifikation von Verpressfehlern auf (KRAUSE, 2003):

- a) Intensität der Ultraschallreflexion an der der Messfläche zugewandten Seite des Hüllrohres: Ein signifikanter Anstieg der Reflektivität kennzeichnet einen Lufteinschluss gegenüber der Reflexion am verpressten Hüllrohr mit Spanndrähten.
- b) Ultraschall-Echos der der Messfläche abgewandten Hüllrohreseite: Sind die Echos unterdrückt, kennzeichnet das einen Lufteinschluss, der die Schallausbreitung unterbindet. Im Gegensatz dazu werden bei vollständig verpressten Bereichen sowohl die Hüllrohrober- als auch die -unterseite akustisch abgebildet.

Der in b) beschriebene Fall ermöglicht die Identifikation von Verpressfehlern als eine Ja/nein-Aussa-

ge, konnte bisher aber erst bei wenigen Messungen nachgewiesen werden. Auch bei den vorliegenden Untersuchungen war ein Rückseitenecho der Spannkanäle nicht eindeutig zu detektieren, sodass nur das unter a) genannte Intensitätskriterium zur Beurteilung des Verpresszustandes herangezogen werden konnte.

Impact-Echo

Die Auswertungen der Messungen an der Hohlkastendecke führen zu der Annahme, dass hier die Reflexionen aus der Tiefenlage der Spanndrähte in den Spannkanälen mit den in Kapitel 3.7.2 beschriebenen Einschränkungen erkennbar sind.

Bei Spannkanal Nr. 3 im Bereich von $y = 5.765$ - 5.965 mm (Bild 31, Kapitel 3.3.2.2) ist die Reflexionsintensität der Rückwand deutlich schwächer als im Mittel der übrigen Messpunkte, was eine unzureichende Verpressung des Spannkanals in diesem Bereich vermuten lässt.

Im Bohrkern BK 4 kann jedoch keine signifikante Zustandsänderung nachgewiesen werden.

Die Bauwerksuntersuchungen in Eichenzell zeigen, dass Reflexionsanzeigen aus dem Bereich der Spannkanäle und Abschwächungen der Rückwand nicht allein als Indiz für unzureichend verpresste Spannkanalabschnitte ausreichen. Inwieweit die Höhe der Reflexionsamplituden für die Zustandsbeurteilung entscheidend sein kann, konnte nicht erörtert werden, da bei den zerstörenden Prüfungen kein relevanter Verpressfehler innerhalb der mit Impact-Echo untersuchten Spannkanäle gefunden wurde.

Ultraschall-Echo

In den Darstellungen der für die zwei Messfelder der Fahrbahnplatte SAFT-rekonstruierten Ultraschalldaten zeichnet sich beim Spannkanal Nr. 3 ein größerer Abschnitt ($y = 4.000$ - 5.000 mm) (Bild 27 und Bild 33) ab, in dem sowohl bei dem Messfeld FBP als auch beim Messfeld HKD die Reflexionssignale des Spannkanals gegenüber anderen Spannkanalbereichen deutlich größer sind (Bild 69).

Betrachtet man in diesem Zusammenhang die Reflexionen der hinter dem Spannkanal liegenden

Rückwand, sind in dem Abschnitt $y = 4.000-5.000$ mm die Rückwandamplituden ebenfalls größer als im angrenzenden Bereich bei $y = 5.000-6.500$ mm (Bild 69). Diese Intensitätserhöhungen sind, wie auch beim Vergleich in Bild 64 deutlich wird, offensichtlich auf eine bessere Ankoppelung der Prüfköpfe an die Messoberfläche zurückzuführen.

Um die ungleichmäßige Einkoppelung der Ultraschallimpulse auszugleichen, wurden die Intensitäten des Spannkanales Nr. 3 und die der abgeschatteten Rückwand auf die mittlere Intensität der

Rückwandreflexe neben dem Spannkanal bezogen.

Das Ergebnis dieser Normierung in Bild 70 zeigt bis auf einen Ausreißer bei $y = 4.800$ mm eine gleichmäßigere Reflexion. Im Allgemeinen sind die Reflexionsintensitäten der Rückwand etwa 3 dB größer als die vom Spannkanal.

Unter Berücksichtigung der zuvor aufgeführten Aspekte wurde angenommen, dass das Hüllrohr im Bereich des Spannkanales Nr. 3 bei $y = 4.500-5.000$

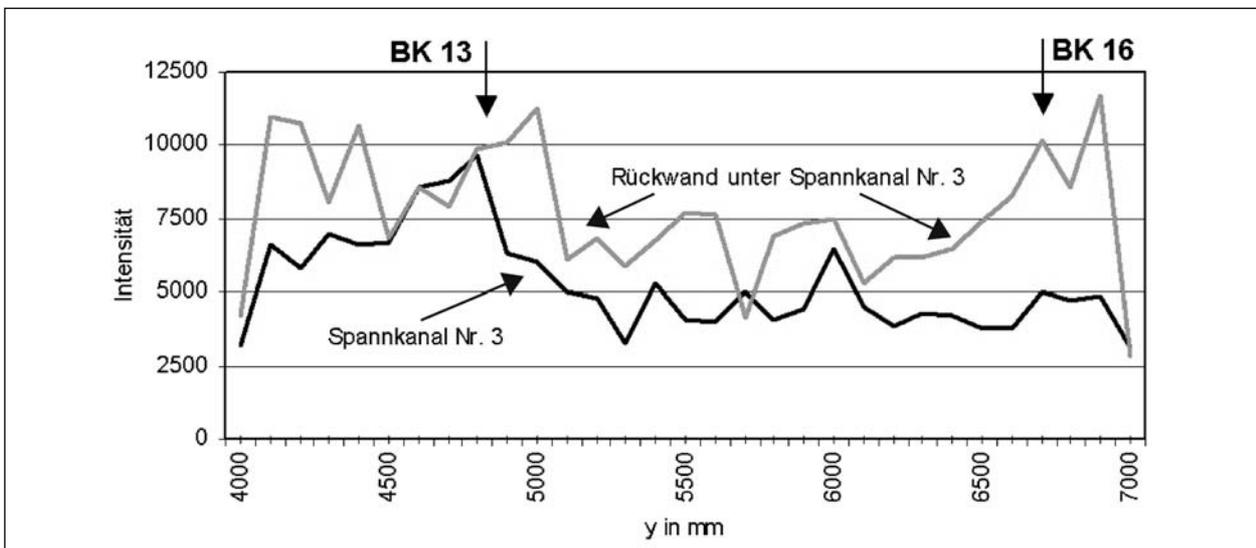


Bild 69: Ultraschall-Echo, Messfeld HKD: Vergleich der Reflexionsintensitäten aus der Tiefe des Spannkanales Nr. 3 und der vom Spannkanal abgeschatteten Bauteilrückwand

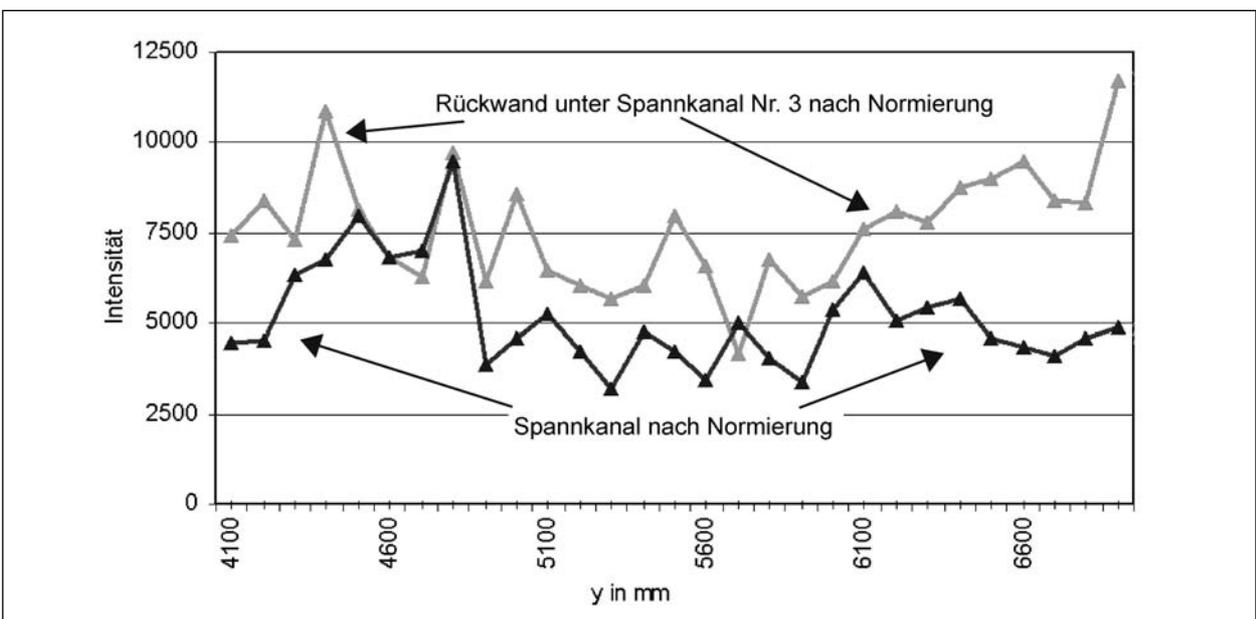


Bild 70: Ultraschall-Echo, Messfeld HKD: Vergleich der Reflexionsintensitäten aus der Tiefe des Spannkanales Nr. 3 und der vom Spannkanal abgeschatteten Bauteilrückwand nach Normierung auf die mittlere Intensität der Rückwandreflexe neben dem Spannkanal (Mittelwert = 16.215, siehe Bild 64)

mm nur einen Verpressfehler geringeren Ausmaßes enthält.

Die Entnahme von Bohrkernen in diesem Bereich bestätigte die Annahme eines Verpressfehlers nicht. In den Bohrkernen BK 3 und BK 12 bis BK 14 erwies sich der Spannkanaal als vollständig verpresst und Unterschiede zu anderen Bohrkernen mit vollständig verpressten Spanngliedern wurden nicht festgestellt.

Die Ultraschallwellen werden demnach auch an vollständig verpressten Spannkanaalen mit unterschiedlicher Intensität reflektiert. Es wird angenommen, dass neben der Ankoppelung der Prüfköpfe an die Messoberfläche auch die Anordnung der Spanndrähte in den Hüllrohren eine wesentliche Rolle spielt. Je nach Anordnung der Drähte werden sich unterschiedliche Streuungen mit anschließender Interferenz ergeben, die zu unterschiedlichen Intensitätsanzeigen der Spannkanaäle führen.

Um diese Frage genauer zu klären, wurden aus den SAFT-rekonstruierten Daten Tiefenplots an den Bohrkernentnahmepositionen erzeugt. In diesen sind für jeweils einen Messpunkt die relativen In-

tensitäten über die Messtiefe aufgetragen. Als Beispiele sind in Bild 71 und Bild 72 die Tiefenplots für die Positionen, an denen die Bohrkern BK 13 und BK 16 entnommen wurden, dargestellt. Zusätzlich wurden bei beiden Tiefenplots die an den Bohrkernen ermittelten Tiefen der Bewehrung, des oberen und unteren Hüllrohrscheitelpunktes, der unteren und oberen Grenze des Spanndrahtbündels sowie die Tiefe der Bauteilrückwand gekennzeichnet.

Die Fotos neben den Tiefenplots veranschaulichen die jeweilige Verteilung der Spanndrähte in den Hüllrohren.

Die Tiefenplots zeigen, dass die Reflexionsintensitäten in den Tiefen der Spannkanaäle nicht unmittelbar durch die der Messfläche zugewandten Hüllrohrseite, sondern sehr wahrscheinlich durch die Anordnung der Spanndrähte im Hüllrohr verursacht werden.

In Bild 71 ist zu erkennen, dass die Reflexionsamplituden mit den am Bohrkern ermittelten Tiefenlagen korrelieren. Die Intensitäten steigen in den Tiefen der ersten Bewehrungslage und der unteren Grenze des Spanndrahtbündels an. Maxima sind in

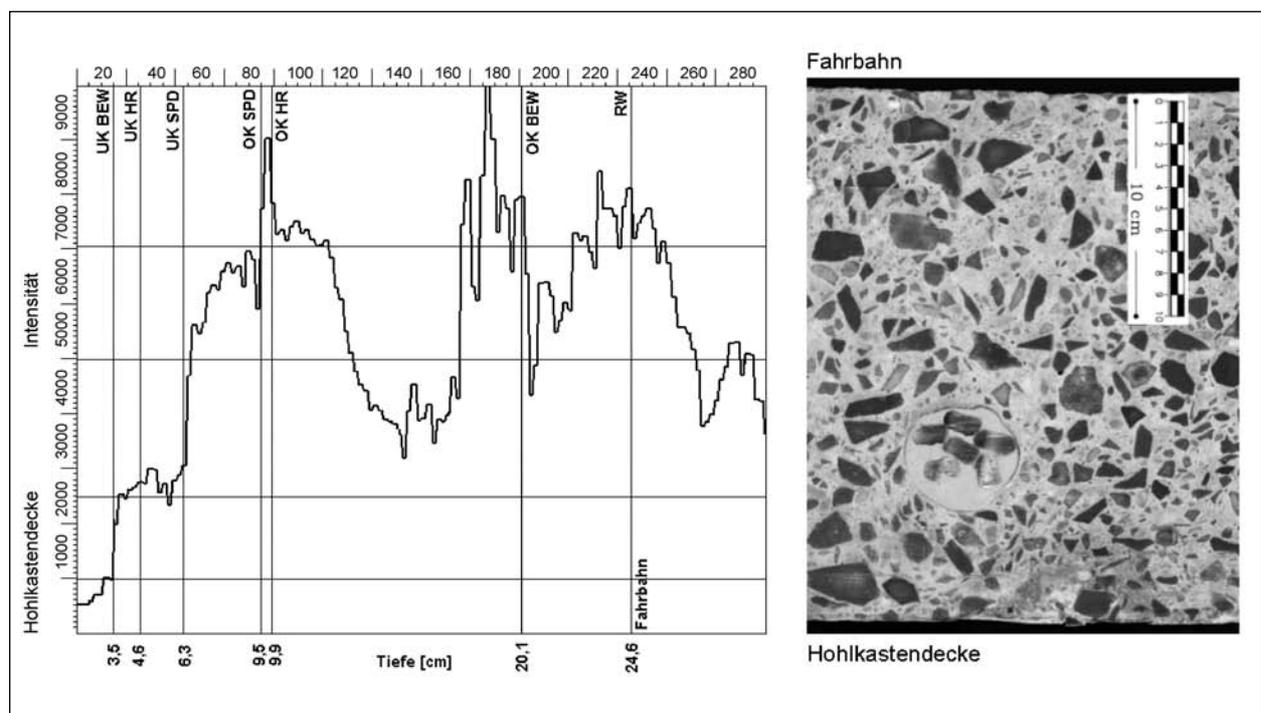


Bild 71: Ultraschall-Echo:

links – Tiefenplot bei $x = 1.463-1.525$ mm, $y = 4.850$ mm (HKD), eingezeichnet sind die tatsächlichen am Bohrkern BK 13 ermittelten Elemente (UK BEW – Stäbe der unteren Bewehrungslage, UK HR – der der Hohlkastendecke zugewandte Hüllrohrscheitel, UK SPD – die der Hohlkastendecke zugewandte Seite des Spanndrahtbündels, OK SPD – die der Fahrbahn zugewandte Seite des Spanndrahtbündels, OK HR – der der Fahrbahn zugewandte Hüllrohrscheitel, OK BEW – Stäbe der oberen Bewehrungslage, RW – Rückwand = Fahrbahn; die Werte wurden Anlage 2 entnommen), rechts – Ausschnitt aus der Bohrkernabwicklung BK 13

den Tiefen der der Messfläche abgewandten Hüllrohrseite, der oberen Bewehrungslage und der Rückwand zu verzeichnen. Der der Messfläche zugewandte Scheitelpunkt des Hüllrohres spiegelt sich im Tiefenplot nicht wider. Dies zeigte sich auch

bei anderen Tiefenplots. Wie im Bild 72 hingegen deutlich wird, treten diese Effekte nicht überall auf. Verallgemeinerte Aussagen lassen sich daher noch nicht ableiten.

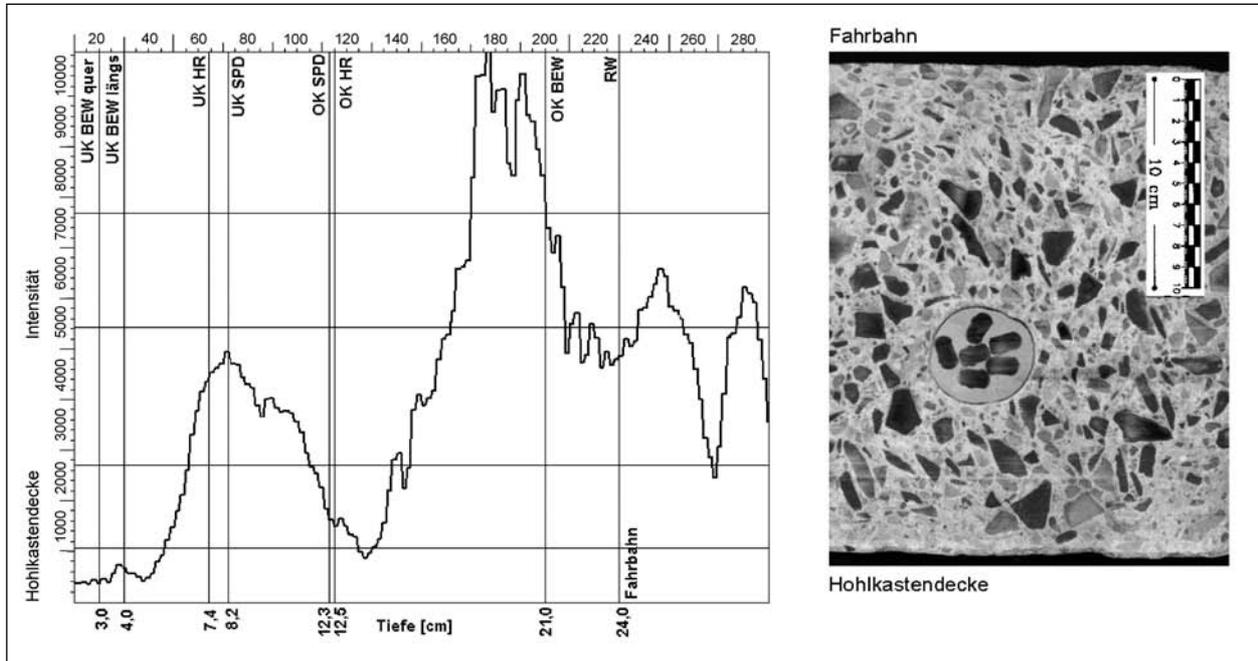


Bild 72: Ultraschall-Echo:

links – Tiefenplot bei $x = 1.463-1.525$ mm, $y = 6.700$ mm (HKD), eingezeichnet sind die tatsächlichen am Bohrkern BK 16 ermittelten Elemente (Erläuterung der verwendeten Kurzbezeichnungen siehe Bild 71), rechts – Ausschnitt aus der Bohrkernabwicklung BK 16

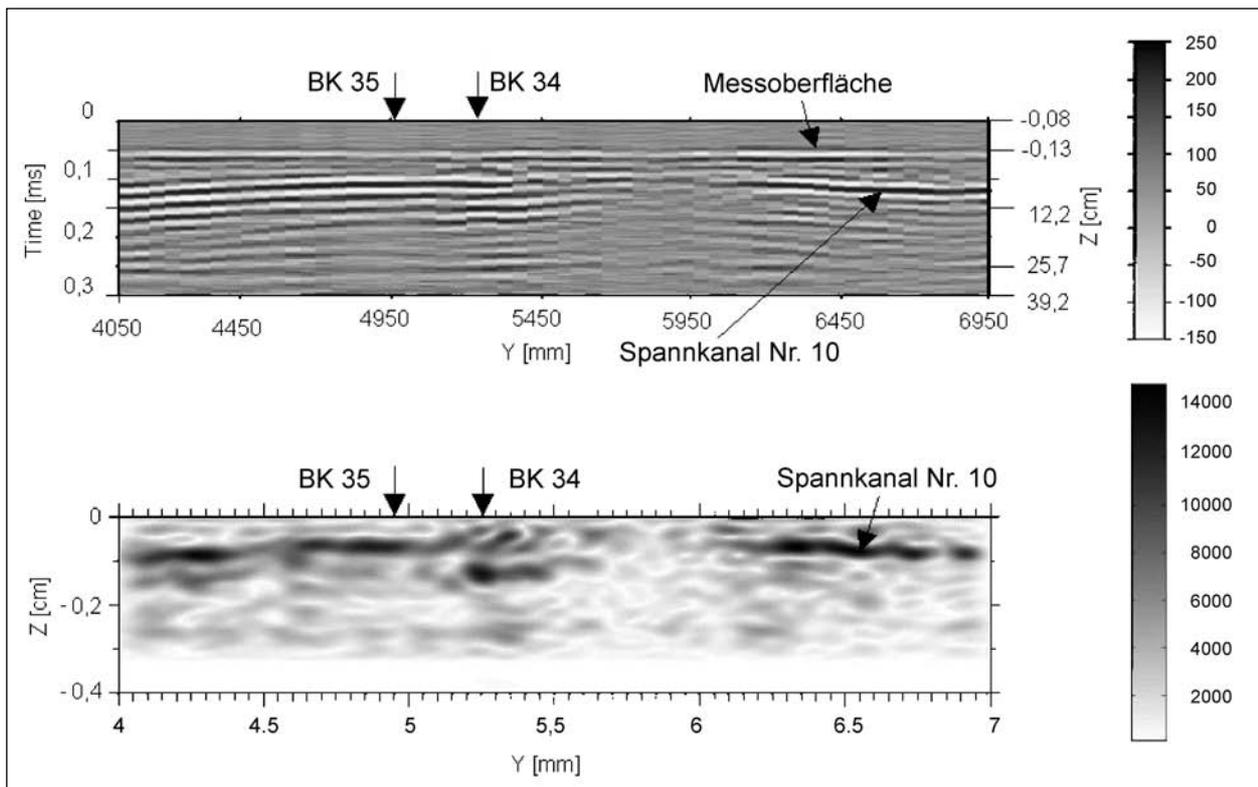


Bild 73: Ultraschall-Echo, Spannkanal Nr. 10 (HKD): oben: B-Bild bei $x = 6.750$ mm, unten: FT-SAFT-Bild bei $x = 6.780$ mm

Die kleine, durch die Entnahme des Bohrkerns BK 35 gefundene Hohlstelle im Spannkanal Nr. 10 kann in den Ultraschallauswertungen nicht festgestellt werden. Dies liegt vermutlich an der in diesem Messbereich aus Zeitgründen gewählten relativ großen Schrittweite von 5 cm. Auch die im Nachgang der Bohrkernentnahmen betrachteten B-Bilder entlang des Spannkanals (Bild 73) liefern keinen Hinweis auf das Vorliegen dieser kleinen Fehlstelle.

3.8 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der Zustand von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken wird in Deutschland im Rahmen der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 erfasst.

Die festgestellten Schäden werden entsprechend der Richtlinie zur einheitlichen Erfassung von Ergebnissen der Bauwerksprüfung, RI-EBW-PRÜF, ausgewertet und in das sich im Aufbau befindende Bauwerks-Management-System aufgenommen. Bei komplexen Schadensbildern oder dem Verdacht visuell nicht erkennbarer Schäden müssen zusätzlich detaillierte Informationen zu Art und Umfang der Schäden erhoben werden. Um Eingriffe für die objektbezogenen Analysen in die bestehende und zu erhaltene Bausubstanz möglichst gering zu halten, wird zunehmend die Anwendung zerstörungsfreier bzw. zerstörungssarmer Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau) angestrebt.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Scannende Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken“ beauftragte die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), den Entwicklungsstand und die Leistungsfähigkeit der von der Fachgruppe IV.4 „Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren“ angewendeten ZfPBau-Verfahren Radar, Impact-Echo und Ultraschall-Echo an einem bestehenden Bauwerk aufzuzeigen.

Für die Untersuchungen wurde die Fuldatalbrücke bei Eichenzell, Baujahr 1966, gewählt. Das Brückenbauwerk besteht aus einem Mehrfeldträger mit einzelligem Hohlkastenquerschnitt. Zum Zeitpunkt 2004 der Beauftragung war bekannt, dass diese Brücke im Zuge des Ausbaus der Autobahn A 66 zurückgebaut und durch einen Neubau ersetzt wird.

Zerstörungsfrei wurden die Fahrbahnplatte und der Hohlkastensteg in ausgewählten Bereichen untersucht.

Ziel war es, die in der Brücke mit nachträglichem Verbund eingebauten Spannglieder der Längs- und Quervorspannung sowie die schlaaffe Bewehrung zu orten. Außerdem sollten mit Impact-Echo und Ultraschall-Echo gegebenenfalls vorhandene Verpressfehler in den Spannkanälen sowie unzureichend verdichtete Bereiche im Beton detektiert werden.

Erstmals erfolgten die ZfPBau-Anwendungen der BAM an einem Bauwerk automatisiert. Zum Einsatz kamen zwei rechnergesteuerte Messabtaster (Scanner) unterschiedlicher Größe, an deren Messkopfhalter die unterschiedlichen Sensoren angebracht werden können. Die Scanner wurden von der BAM, Fachgruppe IV.4, entwickelt.

Durch die Automatisierung konnten die Prüfsensoren schneller und genauer positioniert werden als bei manuellen Messungen. Die rechnergestützte Positionierung der Prüfköpfe erfordert nur die Markierung des Koordinatenursprungs der Messfelder. Das Einmessen und Anzeichnen von Messrastern entfielen. Bei gleichzeitig reduziertem Personalaufwand konnten dadurch deutlich größere Bauwerksflächen als bisher mit den ZfPBau-Prüfverfahren untersucht werden. Die Scanner arbeiteten kontinuierlich und zuverlässig.

An der Ober- und der Unterseite der Fahrbahnplatte wurde der große modulare Scanner montiert und Flächen bis zu 4,00 m x 10,00 m mit einer 1,5-GHz-Radarantenne, einem Impact-Echo-Messkopf und einem Ultraschall-Array mit Punktkontakt-Prüfköpfen untersucht.

Der kleine flexiblere Scanner kam im Inneren des Hohlkastens am Steg zum Einsatz. Der Scanner wurde am Hohlkastensteg mehrmals umgesetzt, sodass mit einem Ultraschall-Prüfkopf eine Fläche von insgesamt 1,45 m x 4,00 m automatisiert abgetastet werden konnte. Zusätzlich erfolgten in diesem Messfeld manuelle Radarmessungen mit einer 1,5-GHz- und einer 900-MHz-Antenne.

Mit allen drei ZfPBau-Verfahren wurden weitgehend identische Messflächen untersucht. Im Ergebnis der Messungen stehen bei jedem Verfahren 3D-Datensätze für die Auswertung zur Verfügung. Durch die Wahl einheitlicher Koordinatensysteme ließen sich die Ergebnisse sehr gut vergleichen und miteinander, z. B. durch Datenfusion, kombinieren.

Aus den 3D-Daten, bei Radar und Ultraschall-Echo zum Teil auch aus SAFT-rekonstruierten Daten und fusionierten Daten, wurden farbkodierte Schnittbil-

der in den jeweils interessierenden Betrachtungsebenen parallel und senkrecht zur Messfläche erzeugt. Anhand der auf diese Weise visualisierten Ergebnisse konnten die laterale Lage und die Betondeckung der schlaffen Bewehrung und der Spannkanäle bestimmt werden. Zum Zustand der Spannkanäle ergaben sich bei der Auswertung der beiden akustischen Verfahren jeweils nur in einem kleinen Bereich Hinweise auf einen unvollständig verpressten Hüllrohrabschnitt. Verdichtungsmängel bzw. Gefügeschäden im Beton wurden nicht festgestellt.

Für die Verifizierung der ZfPBau-Ergebnisse wurden anschließend an die Auswertung der Messungen endoskopische Untersuchungen durchgeführt und insgesamt 43 Bohrkerne entnommen. Schadensursächliche Verpressfehler in den Spannkanälen und Verdichtungsmängel im Beton wurden nicht festgestellt. Die quantitativen Angaben zur Geometrie der Bauteile, zur Lage und Betondeckung von schlaffer Bewehrung und den Spannkanälen bestätigten sich.

Da keine unverpressten Spannkanalabschnitte aufgefunden wurden, konnten die beiden akustischen Verfahren für diese Fragestellung nur eingeschränkt beurteilt werden.

Im Folgenden werden verfahrensbezogen die Ergebnisse der Messungen zusammengefasst, wie sie für weitere Anwendungen der ZfPBau-Verfahren zur Zustandserfassung von Bauteilen von Belang sind.

Radar

- Pro Messfeld wurden je verwendeter Radarantenne zwei Datensätze aufgenommen. Die Polarisation des von der Antenne abgestrahlten elektrischen Feldes war parallel zu kreuzenden Bewehrungsstäben ausgerichtet. Die Aufnahmen der Messspuren erfolgten parallel und senkrecht zur Messfeldachse X im Abstand von 5 cm bzw. 10 cm.
- Hinsichtlich der Eindringtiefe und der Auflösung erwies sich die 1,5-GHz-Antenne als geeignet. Die Spannkanäle und die schlaffe Bewehrung wurden eindeutig detektiert. Im Ergebnis können die Lage der Konstruktionselemente zueinander und die Betondeckung der metallischen Reflektoren bestimmt werden. Angaben zum Durchmesser eingebauter Bewehrungsstäbe und Spannkanäle sowie Zustandsbeschreibungen

dieser Elemente sind verfahrensbedingt nicht möglich. Objekte können durch starke Reflektoren in geringerer Messtiefe abgeschattet werden. Dies war u. a. beim Messfeld am Hohlkastensteg der Fall, wo nur die der Messfläche zugewandten Spannglieder, aber nicht die sich dahinter befindenden Spannglieder detektiert wurden.

- Bewehrungsstäbe mit einem Achsabstand von mindestens 12 cm konnten anhand der aus den Messdaten gewonnenen Darstellungsbildern selektiert werden. Lagen Bewehrungsstäbe dichter beieinander, kann in den Darstellungsbildern die Auflösung zwischen den Stählen durch FT-SAFT-Rekonstruktion der Radardatensätze verbessert werden.
- Die Lage der Quer- und Längsstäbe der jeweiligen Bewehrungslage ließ sich sehr genau beurteilen, nachdem die senkrecht zueinander aufgenommenen und anschließend FT-SAFT-rekonstruierten Radardatensätze durch Datenfusion kombiniert wurden. Im Unterschied zu den Tiefenschnitten, die zur Visualisierung der Messdaten erzeugt wurden, ist in den C-Bildern des Fusionsdatensatzes die Bewehrung in beiden lateralen Richtungen deutlich zu erkennen. Bei der Fusion wurden jeweils die höheren Reflexionsamplituden aus den miteinander kombinierten Datensätzen berücksichtigt.
- Am Hohlkastensteg war bei der 1,5-GHz- und der 900-MHz-Antenne die Absorption im Material zu hoch, um die außenliegende Bewehrung und die Außenseite des Steges in Messtiefen ab ca. 50 cm zu detektieren. Durch die Fusion der Radardaten mit dem komplementären Ultraschall-Echo-Datensatz konnten die Informationen über die Stegbreite und zum Teil zur Bewehrung an der Außenseite des Steges ergänzt werden. Wie am Beispiel der ZfPBau-Anwendungen am Hohlkastensteg aufgezeigt, kann durch die Fusion von Daten unterschiedlicher Verfahren eine höhere Informationsdichte in einem Datensatz erreicht werden. Eine vollständigere Beurteilung des Bauteils wird dadurch möglich.

Impact-Echo

- Die großflächigen Impact-Echo-Messungen an der Fahrbahnplatte wurden mit einer Schrittweite von 5 cm durchgeführt. Auf Impact-Echo-Messungen an der Hohlkastenwand musste aus technischen Gründen verzichtet werden.

- Die Dicken der untersuchten Bauteilabschnitte, auch im Bereich der Vouten, konnten eindeutig detektiert und mit einer hohen Genauigkeit angegeben werden. Aufgrund von Verschiebungen der Rückwandsignale zu niedrigeren Frequenzen wurde die laterale Lage der Spannkanäle sicher bestimmt.
- Reflexionssignale, die den Spannkanälen direkt zuzuordnen sind, traten nur bei den Messungen an der Hohlkastendecke auf. Punktuell verifizierte Messtiefen korrelieren mit den an Bohrkernen ermittelten Betondeckungen über den Spannkanälen.
- Die Auswertung der C- und B-Bilder wies nur einen kleinen Spannkanalbereich aus, in dem gleichzeitig hohe Reflexionsintensitäten am Spannkanal und stärkere Rückwandverschiebungen auf das Vorhandensein eines Verpressfehlers hindeuteten. Der durch Bohrkernentnahme überprüfte Spannkanal wies jedoch keine Mängel auf. Es muss davon ausgegangen werden, dass die genannten Indizien allein nicht für die Charakterisierung unzureichend verpresster Spannkanäle ausreichen.

Ultraschall-Echo

- Bei den Untersuchungen der großen Messflächen hat sich der Ultraschallmesskopf mit den 24 Transversalwellenprüfköpfen bewährt. Sehr von Vorteil für die Anwendung an Bauwerken, aber auch für die Automatisierung des Messablaufes ist, dass durch den punktuellen Kontakt der Prüfköpfe an die Messoberfläche kein Koppelmittel wie bei anderen Ultraschallprüfköpfen erforderlich ist.
- An den vollständig verpressten Spannkanälen wurden die Ultraschallwellen mit geringer Intensität reflektiert. Am Hohlkastesteg konnten die der Messfläche zugewandten Spannkanäle detektiert werden, die hinter der ersten Lage angeordneten Spannkanäle wurden ebenso wie die Rückwand abgeschattet. Rauere Messoberflächen wie auf der Fahrbahnplatte wirken sich nachteilig auf die Ortung der Spannkanäle aus.
- Die Lage der Spannkanäle parallel zur Messfläche konnte zuverlässig anhand der Reflexionen der Spannkanäle und der Abschattungen der sich dahinter befindenden Bauteilrückwände ermittelt werden. Sind die Intensitäten der

Spannkanalanzeigen größer als das Kornrauschen des umgebenden Betongefüges, kann die Betondeckung über den Spannkanälen angegeben werden.

- Höhere Reflexionsintensitäten von einem Spannkanal der Quervorspannung wurden auf einen unzureichend verpressten Hüllrohrbereich zurückgeführt. Die Entnahme von Bohrkernen bestätigte dieses Resultat nicht. Allgemein wird angenommen, dass die aufgetretenen Intensitätsschwankungen an den Spannkanälen im Wesentlichen durch unterschiedliche Ankopplung des Messkopfes an die Oberfläche, aber auch durch die sich ändernde Verteilung der Litzen in den Hüllrohren herbeigeführt werden.
- Im Unterschied zu Radar wurde mit Ultraschall-Echo die nicht abgeschattete Rückwand des gevouteten Hohlkastesteges mit Breiten bis zu 60 cm sicher detektiert.
- Auch die Lage der schlaffen Bewehrung konnte ermittelt werden. Die von der Messfläche weiter entfernte Bewehrungslage wurde deutlicher detektiert als die Bewehrung unmittelbar unter der Messfläche. Ähnlich wie bei Radar waren die Reflexionsintensitäten der Bewehrung in Ausbreitungsrichtung der gesendeten Transversalwellen stärker als die der senkrecht dazu angeordneten Bewehrung. Prinzipiell ist dem Ultraschall-Echo-Verfahren für die Ortung schlaffer Bewehrung jedoch das schnellere und genauere Radar-Verfahren vorzuziehen.
- Für die Rekonstruktion der Ultraschalldaten wurde erstmalig das an der Universität Kassel entwickelte FT-SAFT angewendet. Auch die mit einer Schrittweite von 5 cm aufgenommenen Ultraschall-Echodaten konnten damit erfolgreich rekonstruiert werden.

Einige nach dem heutigen Forschungsstand noch nicht geklärte Aspekte werden im Bericht aufgezeigt und an Ergebnissen erörtert. Die daraus resultierenden Ergebnisse bzw. Schlussfolgerungen für die weitere Forschungstätigkeit sind im folgenden aufgeführt.

- Aus früheren Forschungsarbeiten (SANSALONE, 1997; KRIEGER, 2002) folgt, dass die Tiefe d von Reflexionen an Stahl durch Modifikation der Berechnungsformel ($f = v/2d$) aus der Messfrequenz f zu ermitteln ist. Nach SANSALONE, 1997 ist bei Reflexionen an Spann Stahl der Quotient 4 statt 2 zu berücksichtigen. Aus den an Bohrkernen ge-

messenen Betondeckungen und den entsprechenden mit Impact-Echo ermittelten Messfrequenzen resultieren Quotienten zwischen 3,0 und 4,7. Mit zunehmender Betondeckung über den Spannlitzen verringert sich der Quotient.

- Mit Impact-Echo sind in C-Bildern in den Tiefen der schlaffen Bewehrung regelmäßige Muster zu erkennen, die auch schon bei Impact-Echo-Messungen an anderen großen stark bewehrten Untersuchungsobjekten festgestellt wurden.
- Die Möglichkeit, Ultraschall-Echo-Daten mit verschiedenen Rekonstruktionsalgorithmen auszuwerten, ist vertieft zu untersuchen. Es wird erwartet, dass sich daraus neue Erkenntnisse zu den in die Berechnungen einfließenden Parametern, wie z. B. der Schrittweite und des Berechnungswinkels, ableiten lassen die später für die Optimierung der SAFT-Berechnungen und -Ergebnisse genutzt werden können.

Die ZfPBau-Verfahren haben mittlerweile einen technischen Stand erreicht, der es zulässt und gleichzeitig für die weitere Entwicklung und Bewertung erfordert, die Verfahren unter realen Einsatzbedingungen zu erproben. Insbesondere die Leistungsfähigkeit der akustischen Verfahren zur Ortung von Verpressfehlern in Spanngliedern ist weiterführend an geeigneten Objekten zu untersuchen.

Um noch offene Fragestellungen auch systematisch an einem Objekt mit bautechnisch verpressen Hüllrohren untersuchen zu können, wurde aus dem Hohlkastensteg der rückgebauten Fuldatabrücke ein Teilstück herausgeschnitten, s. Bild 74. Es enthält neben Spannkäneln auch Koppelglieder und steht auf dem Versuchsgelände der BAM für weiterführende Untersuchungen bereit.

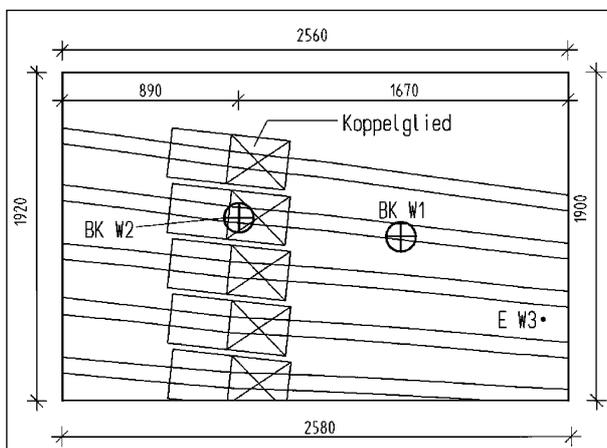


Bild 74: Probekörper: Teilstück aus dem Hohlkastensteg im Bereich der Koppelglieder

4 Schlussfolgerungen

Die Verfahren Radar, Impact-Echo und Ultraschall der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) haben ihre Einsatzfähigkeit auch unter „in situ“-Bedingungen und mit Hilfe eines Scanners bewiesen. Durch die Abtastung derselben Messpunkte mit Hilfe verschiedener Verfahren ist eine Datenfusion möglich geworden, die die Vorteile der verschiedenen Verfahren optimal nutzen kann.

Als nächster Schritt müssen der Scanner und die Datenauswertung für einen Einsatz im Rahmen der objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) optimiert werden; d. h., die Montage des Scanners sollte vereinfacht und die Zeiten für Auf- und Abbau verkürzt werden. Zudem ist es notwendig, ein Verfahren zu entwickeln, das eine Eingrenzung der Bauwerksfläche auf „Verdachtsbereiche“ ermöglicht, denn ein vollflächiger Einsatz des Scanners mit den notwendigen Zeiten und Kosten für ein mehrmaliges Umsetzen des Scanners ist zurzeit nicht wirtschaftlich.

Trotz der Automatisierung bei der Datenerfassung und des Einsatzes von spezieller Auswertesoftware werden der Einsatz und die Auswertung der hier benutzten ZfP-Verfahren auch mittelfristig nur geschultem Fachpersonal vorbehalten werden, das besondere Erfahrungen im Umgang mit diesen Verfahren hat.

Es kann angenommen werden, dass die Verfahren der ZfP in Zukunft einen größeren Stellenwert im Rahmen der Bauwerksprüfung erhalten werden.

5 Literatur

- [1] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung, Ausgabe November 1999
- [2] RI-EBW-PRÜF: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076, Bundesministerium für Verkehr, Ausgabe 1998
- [3] N. N.: Leitfaden objektbezogene Schadensanalyse, Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, 2003
- [4] GARDEI, KOHL, STREICHER, WÖSTMANN, WIGGENHAUSER: Scannende Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Brückenbauwerken, FE 86.028/2003/AP im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2004
- [5] KRAUSE, KRIEGER, WIGGENHAUSER: Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Betonbrücken; Messungen an der Talbrücke Michelsrombach (Teil I und II); AP 98.241/B4 der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2000
- [6] BERTHOLD, KRIEGER, RATH: Einsatzmöglichkeiten des Tunnelscanners bei der Zustandsuntersuchung von Verkehrstunneln; AP 00.240/B4 der Bundesanstalt für Straßenwesen, 2001
- [7] SCHICKERT, KRAUSE, WIGGENHAUSER: ZfPBau-Kompendium; http://www.bam.de/service/publikationen/zfp_kompendium/welcome.html

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. Hase, 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 Fahrbelagplatte
Krieger, Rat € 17,50
- B 9: Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode bei Betonbrücken
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 Rodenkirchener Brücke
Goebel € 15,50
- B 13: Strukturanalyse von Beton
Gatz, Gusia € 11,00

1997

- B 14: Verhalten von Fahrbelagübergängen aus Asphalt infolge Horizontallasten
Krieger, Rath € 16,00
- B 15: Temperaturbeanspruchung im Beton und Betonersatz beim Einbau von Abdichtungen
Großmann, Budnik, Maaß € 14,50
- B 16: Seilverfüllmittel – Mechanische Randbedingungen für Brückenseile
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 € 16,50
- B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten Beschichtungen
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 Untergründe
Schröder, Sczyslo € 11,00
- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünnbeläge 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 Bauwerksprüfung
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 Karbonisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutionsarme 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 Korrosivitätskategorien aus Massenverlustraten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbelagplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbeläge 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 Talbrücke 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 Fahrbahn-
tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Kückler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Von A. Städing, T. Krockner € 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: 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 Brü-
ckenseilen 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 für
Brückenbauwerke
Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann,
Wiggenhauser € 15,00

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.