

Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 54

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

Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen

von

Edmund Rath
Gerd Berthold
Hartmut Lähler

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 54

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 02241 des Arbeitsprogrammes der Bundesanstalt für Straßenwesen:

Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen mit Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung (ZfP) gemäß der „Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen (RI-ZFP-TU)“ - Tunnel Burgholz im Zuge der L 418 bei Wuppertal

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 0943-9307

ISBN(10) 3-86509-600-X

ISBN(13) 978-3-86509-600-5

Kurzfassung

Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen

Erfahrungen aus der Praxis deuten darauf hin, dass mit Verfahren der zerstörungsfreien Prüfungen (ZfP) nicht in jedem Fall der Erfolg von Injektionen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen nachweisbar ist. Obwohl die „Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen“ (RI-ZFP-TU) [1] in Ausnahmefällen auch die Überprüfung des Erfolges durchgeführter Mängelbeseitigungen durch zerstörende Untersuchungen vorsieht, wird durch die beteiligten Straßenbauverwaltungen vielfach ein Nachweis mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren im Rahmen der Eigenüberwachung und der Fremdüberwachung gefordert [1,3,4].

Mit Schreiben S25/16.58.30/11 BASt 02 vom 15. April 2002 hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) der Durchführung von Untersuchungen zur Überprüfung der festgestellten Problematik zugestimmt.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode n zur Bestimmung der Tunnelinnenschalendicke. Es wurden Messungen an drei Blöcken durchgeführt. Die beteiligten Messteams besitzen alle die Anerkennung nach „RI-ZFP-TU“. Drei unterschiedliche ZfP-Messverfahren kamen zum Einsatz. Gemessen wurde vor und nach der Firstspaltverpressung.

Als Ergebnis ist festzustellen, dass die Qualität bzw. der Erfolg der durchgeführten Firstspaltverpressung mittels eines Injektionsgutes in den Messungen nicht zweifelsfrei bestätigt werden konnte und daher zusätzlich durch Kernbohrungen und endoskopische Aufnahmen überprüft wurde.

Mit den hier gewonnenen Erkenntnissen werden wesentliche Aspekte und Empfehlungen aufgeführt, die im Umgang mit den zerstörungsfreien Prüfmethode n zur Dickenbestimmung einer Tunnelinnenschale zu beachten sind und in zukünftige Projekte und Regelwerke einfließen.

Erfahrungen aus der Praxis deuten darauf hin, dass mit Verfahren der zerstörungsfreien Prüfungen (ZfP) nicht in jedem Fall der Erfolg von Injektionen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen nachweisbar ist. Obwohl die „Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen“ (RI-ZFP-TU) [1] in Ausnahmefällen auch die

Überprüfung des Erfolges durchgeführter Mängelbeseitigungen durch zerstörende Unter-

suchungen vorsieht, wird durch die beteiligten Straßenbauverwaltungen vielfach ein Nachweis mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren im Rahmen der Eigenüberwachung und der Fremdüberwachung gefordert [1,3,4].

Mit Schreiben S25/16.58.30/11 BASt 02 vom 15. April 2002 hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) der Durchführung von Untersuchungen zur Überprüfung der festgestellten Problematik zugestimmt.

Der vorliegende Beitrag befasst sich mit der Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode n zur Bestimmung der Tunnelinnenschalendicke. Es wurden Messungen an drei Blöcken durchgeführt. Die beteiligten Messteams besitzen alle die Anerkennung nach „RI-ZFP-TU“. Drei unterschiedliche ZfP-Messverfahren kamen zum Einsatz. Gemessen wurde vor und nach der Firstspaltverpressung.

Als Ergebnis ist festzustellen, dass die Qualität bzw. der Erfolg der durchgeführten Firstspaltverpressung mittels eines Injektionsgutes in den Messungen nicht zweifelsfrei bestätigt werden konnte und daher zusätzlich durch Kernbohrungen und endoskopische Aufnahmen überprüft wurde.

Mit den hier gewonnenen Erkenntnissen werden wesentliche Aspekte und Empfehlungen aufgeführt, die im Umgang mit den zerstörungsfreien Prüfmethode n zur Dickenbestimmung einer Tunnelinnenschale zu beachten sind und in zukünftige Projekte und Regelwerke einfließen.

Proof of the success of injection measures for removing defects in the case of a reduced thickness in the inner shell of tunnels.

Practical experience indicates that non-destructive testing procedures (ZfP) do not reveal the success of injections for the removal of defects when there is a reduced thickness in the inner shell of tunnels in all cases. Although the "Directive for the use of non-destructive tests in the inner shell of tunnels" (RI-ZFP-TU)[1] includes the testing of the success of the removal of defects through destructive tests in exceptional cases as well, the road construction authorities involved often ask for proof using a non-destructive test procedure within the scope of internal and external quality control. [1,3,4].

The Federal Ministry of Transport, Construction and Housing (BMVBW) has agreed to the conducting of investigations for checking the problems determined in the notification S25/16.58.30/11 BASt 02 dated 15. April 2002.

The following contribution deals with the use of non-destructive test methods in determining the thickness of the inner shell of tunnels. The measurements were conducted on three units. The measurement teams involved have all been recognised under "RI-ZFP-TU." Three different ZfP measurement procedures were used. Measurement took place before and after the top injection.

Results show that the quality and the success of the top injection using an injection medium could not be completely confirmed in the measurements and was therefore additionally checked using core hole drilling and endoscopic recordings.

Important aspects and recommendations are listed using the findings acquired in this investigation. They must be observed when dealing with non-destructive tests for determining the thickness of the inner shell of a tunnel and must be included in future projects and bodies of rules and regulations.

Inhalt

1	Allgemeines	7
1.1	Anlass.....	7
1.2	Einleitung.....	7
2	Bauwerk	8
3	Messstellen und Messpunkte ...	9
3.1	Messstellen	9
3.2	Messpunkte	9
4	Impakt-Echo-Messverfahren ..	10
4.1	Funktionsweise.....	10
4.2	Messgenauigkeit	11
5	Durchführung der Messung ...	12
5.1	Impakt-Echo-Messung	12
5.2	Kalibrierung	12
5.3	Videoscopeaufnahmen	13
6	Auswertung der Messwerte	14
6.1	Flächendarstellung	14
6.2	Vergleich der Impakt-Echo-Messwerte .	14
6.3	Wiederholungsmessung.....	19
6.4	Messung nach der Injektion	19
7	Ultraschall-Echo-Mess- verfahren	19
7.1	Funktionsweise.....	19
7.2	Durchführung der Messung.....	20
7.3	Darstellung der Messwerte	20
8	Radar-Impuls-Mess- verfahren	21
8.1	Funktionsweise.....	21
8.2	Durchführung der Messung und Auswertung	22
9	Detailuntersuchung in Block 136.2.....	22
10	Vergleich der Mess- verfahren	23
11	Zusammenfassung und Ausblick	25
12	Literatur	25

1 Allgemeines

1.1 Anlass

Erfahrungen aus der Praxis deuten darauf hin, dass mit Verfahren der zerstörungsfreien Prüfungen (ZfP) nicht in jedem Fall der Erfolg von Injektionen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen nachweisbar ist. Obwohl die „Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen“ (RI-ZFP-TU) [1] in Ausnahmefällen auch die Überprüfung des Erfolges durchgeführter Mängelbeseitigungen durch zerstörende Untersuchungen vorsieht, wird durch die beteiligten Straßenbauverwaltungen vielfach ein Nachweis mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren im Rahmen der Eigenüberwachung und der Fremdüberwachung gefordert [1,3,4].

Mit Schreiben S25/16.58.30/11 BASt 02 vom 15. April 2002 hat das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) der Durchführung von Untersuchungen zur Überprüfung der festgestellten Problematik zugestimmt.

1.2 Einleitung

Verkehrstunnel im Zuge von Bundesfernstraßen werden in der Regel in zweischaliger Bauweise ausgeführt. Ein wesentliches Qualitätsmerkmal dieser Bauweise stellt die Einhaltung der Sollstärke der Innenschale und damit die Vermeidung von Minderdicken im Bereich der Firste und von Dickensprüngen im Bereich der Fugen zwischen einzelnen Blöcken dar.

Bei der Herstellung des Tunnels wird nach dem Ausbruch des Felsgesteins Spritzbeton auf die Felswand als temporäre Sicherung und um die Ausbruchsunebenheiten bis zu einem bestimmten Maße auszugleichen, aufgebracht. Zwischen der Tunnelinnenschale und dem Fels befindet sich eine Abdichtung. Wenn durch Wassereintrich die Abdichtung auf die in Hohlräumen freiliegende Bewehrung oder auf mögliche vorhandene Versatzkanten der Dickensprünge an den Blockfugen gedrückt wird, können Risse oder Löcher an der Abdichtung entstehen.

Im Rahmen der Bauüberwachung neu erstellter Verkehrstunnel im Zuge von Bundesfernstraßen ist deshalb die Dicke der Tunnelinnenschale unter Verwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren flächig zu überprüfen, wobei insbesondere der Firstbereich sowie der Bereich der Blockfugen zu untersuchen sind. Der Erfolg eventuell durchgeführter Mängelbeseitigungen ist durch Wiederholungsmessungen oder in Ausnahmefällen durch zerstörende Untersuchung zu überprüfen.

Die „Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen“ (RI-ZFP-TU) wurde im Jahre 2001 durch das Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) mit „Allgemeines Rundschreiben Straßenwesen Nr. 14/2001“ veröffentlicht und an die Obersten Straßenbaubehörden der Länder zur Einführung übersandt. Die RI-ZFP-TU dient zur Qualitätssicherung und Vereinheitlichung der Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei der Dickenüberprüfung von Tunnelinnenschalen im Rahmen der Bauüberwachung. Der Erfolg von Maßnahmen zur Mängelbeseitigung, z. B. Kontaktinjektionen, ist ebenfalls im Rahmen der Bauüberwachung zu überprüfen. Zum Einsatz kommen bei der Dickenüberprüfung in erster Linie Echo-Verfahren der ZfP: Impakt-Echo, Ultraschall-Echo und bei großmaschiger oder nichtvorhandener Bewehrung Radar-Impuls-Messverfahren.

Um die Qualität der Untersuchungsergebnisse sicherzustellen, dürfen mit der Durchführung der Messungen nur die durch die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) anerkannten Firmen beauftragt werden. Art und Umfang der Anerkennung, Geräte, Qualifikation des Personals und die Messung an einem Probekörper sind in der RI-ZFP-TU festgelegt.

Im Rahmen von Voruntersuchungen konnte bei der in situ durchgeführten Dickenüberprüfung in einzelnen Fällen der Erfolg von Injektionen zur Mängelbeseitigung durch zerstörungsfreie Prüfung nicht nachgewiesen werden. Die betreffenden Stellen mussten zusätzlich angebohrt und mittels Endoskopie untersucht werden.

Ziel des Projektes 02 241/B4 war es nun, Kriterien für den Einsatz der ZfP zum Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen festzulegen. Mehrere Firmen, die die Anerkennung besitzen, nahmen an den Messungen teil.

- **Mit dem Impakt-Echo-Messverfahren:**

- Ingenieurbüro Flohrer
Hirtengasse 13, 63263 Neu Isenburg
- Firma Bilfinger Berger AG
Carl-Reiß-Platz 1-5, 68165 Mannheim
- MFPA Weimar
Postfach 2310, 99404 Weimar

- **Mit dem Ultraschall-Echo-Messverfahren:**

- Firma Betontest
Mühlenstraße 68, 64297 Darmstadt

- **Mit dem Radar-Impuls-Messverfahren:**

- Bilfinger Berger AG
Carl-Reiß-Platz 1-5, 68165 Mannheim
- Ingenieurbüro Flohrer
Hirtengasse 13, 63263 Neu Isenburg
- Firma von der Lieck Messtechnik
Grebbeener Straße 7, 52525 Heinsberg
- GeoHires International Ltd.
Postfach 1141, 46301 Borken

Im Rahmen der Untersuchungen erfolgten auch Messungen mit Impakt-Echo und Ultraschall-Echo durch die Bundesanstalt für Straßenwesen. Im „Tunnel Burgholz“ bei Wuppertal, beschrieben in Pkt. 2 Bauwerk, konnte die Messstelle eingerichtet werden. Am 04.11.2002 wurden in einer Besprechung mit allen beteiligten Messteams die Ziele und das einheitliche Vorgehen festgelegt. Es sollte im ersten Schritt (erster Messdurchlauf) vor der Nachinjektion der Nachweis der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der einzelnen Messsysteme untereinander überprüft und nachgewiesen werden. Nach dem Betonieren der drei als Prüfblöcke vorgesehenen Tunnelinnenschalen und der Erhärtungszeit von 90 Tagen erfolgten die ersten Messungen mit Impakt-Echo-Verfahren und Ultraschall-Echo-Verfahren in dem Zeitraum vom 25.11.03 bis 11.12.2003. Jedem Messteam standen 2 Tage zur Verfügung. Die Impuls-Radarmessungen erfolgten am 18.03.2004, 06.04.2004 und 07.04.2004. So war es auch möglich, vor der Injektionsmaßnahme eventuell vorhandene Fehlstellen und Hohlstellen zu erkennen und zu dokumentieren.

Die zweiten Messungen erfolgten 30 Tage nach der Injektionsmaßnahme im Oktober 2004. Zu diesem Zeitpunkt waren die Minderdicken und Hohlstellen bekannt und es war möglich, beim Vergleich der beiden Messungen nachzuweisen, dass der Verbund zwischen Injektionsgut und Tunnelinnenschalenbeton vorhanden und auch nachzuweisen ist. Bei der Auswertung standen Vermessungsdaten der Tunnel-Laserscanner Abstandsmessungen (LA) zur Profilkontrolle zur Verfügung. Diese Messungen wurden einmal nach Aufbringen des Spritzbetons (Erkennen von Überprofil) und einmal nach dem Betonieren der Tunnelinnenschale (Lichtraumprofilkontrolle) durchgeführt. In diesen Vermessungsdaten ist die Sollstärke, Minderstärke und die Überstärke protokolliert. So konnte die vorhandene Dicke der Tunnelinnenschale ermittelt und mit den im ZfP-Verfahren gemessenen Daten verglichen werden.

2 Bauwerk

Im Frühjahr 2003 wurde zusammen mit dem Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen Niederlassung Essen (im folgenden „Landesbe-

trieb Straßenbau NRW“ genannt) der „Tunnel Burgholz“ im Zuge der L 418 ausgewählt. Die Messungen erfolgten in Abstimmung mit dem Landesbetrieb Straßenbau NRW und der ATB Bauleitung.

Der 1,8 km lange „Tunnel Burgholz“ ist das Kernstück der 2,5 km langen Neubaumaßnahme an der L 418 im Süden Wuppertals. Mit dem letzten Teilstück der L 418 und der weiterführenden L 419 entsteht eine Südumgehung der Stadt Wuppertal zwischen dem Sonnborner Kreuz (A46) im Westen und der Anschlussstelle Wuppertal-Ronsdorf (A1) im Osten. Den Hauptabschnitt der Straßenbaustelle bildet der Doppelröhren-Tunnel „Burgholz“, Westportal Tunneleinang (Bild 1 und 2). Mit „gebirgsschonendem“ Sprengverfahren erfolgte der Vortrieb von beiden Seiten gleichzeitig. Dabei sind 300.000 Kubikmeter Ausbruchmaterial angefallen.

Die Tunnelröhren sind elf Meter breit und sieben Meter hoch. Jede Röhre umfaßt zwei Richtungsfahrbahnen, einen Standstreifen und zwei Notgehwege an den Fahrbanrändern nach RABT RQ 26 Tr.



Bild 1: Westportal Tunnelröhre Nord und Süd



Bild 2: Westportal, Tunnelröhre Nord während der Bauphase

Es wurden sechs Querverbindungen im Abstand von 270 m realisiert. Zwei davon sind befahrbar, vier sind begehrbar und dienen als Fluchtwege.

Baukosten:	82 Mio. Euro
Baubeginn:	Frühjahr 2002
Bauende:	Sommer 2006
Gesamtlänge:	2550 m
Tunnellänge:	1800 m
freie Strecke:	750 m.

Nach Abschluss des Vortriebes erfolgt der Einbau der Ortbetoninnenschale in WU-Beton, Festigkeitsklassen C25/30 und C35/45. Die Dicke der Innenschale beträgt im Regelbereich durchgehend 35 cm.

Die Herstellung der Innenschale erfolgte blockweise. Die Länge der Blöcke beträgt jeweils ca. 10 m. Die Innenschale ist berg- und luftseitig mit einer kreuzenden Bewehrung aus Betonstahlmatten (Regeldurchmesser 8 bis 10 mm) im Raster von 15 cm und stellenweise einer lokalen Zulagebewehrung aus Stabstahl bewehrt. Der Beton für das Gewölbe setzt sich zusammen aus Zement Cem III 42,5 R, Flugasche, Zusatzmittel und Kieszuschlag 0/16.

Es folgt rundum der Einbau der Schutzvliessschicht (Geotextil mit einem Flächengewicht von 500 g/m²) und der Kunststoffdichtungsbahn aus flexiblen Polyolefinen KDB (PE) mit einer Mindestdicke von d = 2 mm.

3 Messstellen und Messpunkte

3.1 Messstellen

In Absprache mit dem Landesbetrieb Straßenbau NRW und dem Ingenieurbüro Maidl (Bauaufsicht) wurden die Tunnelinnenschalen-Blöcke 136.2, 137.2 und 138.2 in der Nordröhre als Prüfblöcke ausgesucht. Die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) trug auf die Blöcke 138.2 und 137.2 das in der RI-ZFP-TU vorgeschriebene Messraster (0,80 x 0,80 m) auf. Damit war sichergestellt, dass alle Messteams an den gleichen Punkten messen. Der Block 136.2 blieb ohne Messraster. Hier trug jedes Messteam das Messraster selbst auf. Somit ist bei auftretenden Streuungen ein Vergleich der Messungen mit und ohne angezeichnetem Messraster möglich.

3.2 Messpunkte

Bild 3 zeigt den Block 138.2 mit aufgebrachtem Messraster und Numerierung der Messpunkte. Die Blöcke sind hier entgegengesetzt zur Fahrtrichtung aufsteigend nummeriert.

Am Blockanfang verlief je eine Messlinie radial in einem Abstand von 0,20 m und 1,00 m nach der Fuge. Am Blockende verlief je eine Messreihe in einem Abstand von 1,00 m und 0,20 m vor der Fuge. Die Messlinien hatten eine Länge von 11,20 m. Der Abstand der Messpunkte untereinander hat das nach RI-ZFP-TU vorgeschriebene Raster von 0,80 m x 0,80 m (Bild 3).

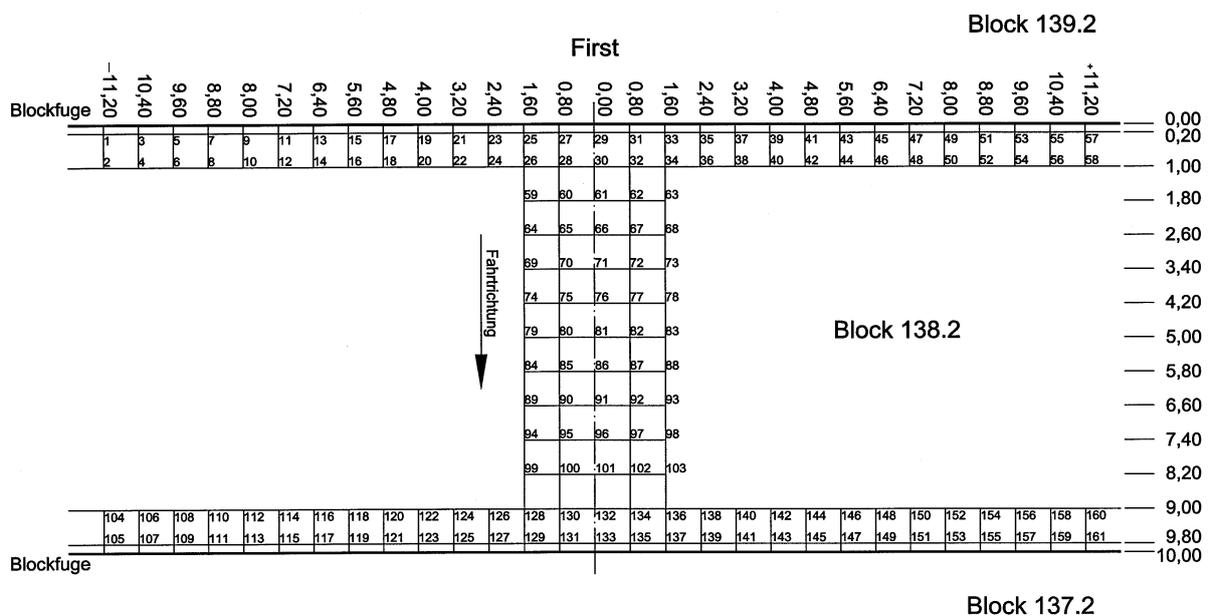


Bild 3: Block 138, Messgitter nach RI-ZFP-TU mit der Numerierung der Messpunkte

Die Blocklänge beträgt im Normalfall 10 m. In Tunnel-Längsrichtung im Firstbereich sind 5 Messlinien aufgetragen. Es ist sinnvoll, die Firste als Nulllinie (0,00) festzulegen, und die Messpunkte in Blickrichtung rechts von der Firste mit plus (+) und links mit minus (-) zu kennzeichnen. So ist die Numerierung angelehnt an die Beschriftung des Koordinatensystems. Es ergeben sich folgende Messlinienabstände: +1,60 m, +0,80 m, 0,00 m, -0,80 m, -1,60 m. Der Abstand der Messpunkte hat das nach RI-ZFP-TU vorgeschriebene Raster von 0,80 m x 0,80 m (Bild 3).

Die Messpunktnumerierung ist in Block 138.2 mit Nr. 1 bis 161, in Block 137.2 mit Nr. 301 bis 461 und in Block 136.2 mit Nr. 601 bis 761 festgelegt. Bild 3 zeigt exemplarisch die Messpunktnumerierung. Es ergeben sich für einen Block 161 Messpunkte und für die drei Blöcke 483 Messpunkte.

4 Impakt-Echo-Messverfahren

4.1 Funktionsweise

Die grundsätzliche Funktionsweise der eingesetzten Impakt-Echo-Messsysteme ist gleich. Die Geräte zur Digitalisierung und Aufbereitung der Messsignale sind gering unterschiedlich, was jedoch keinen Einfluß auf das Messergebnis hat. Von der BAST wurde das Impakt-Echo-Messsystem von der Firma W. Streett Impakt Echo Instr., Ithaca (USA) eingesetzt (Bild 4). Mit einer der abgebildeten Stahlkugeln (Detail 2 in Bild 4) wird ein Stoß (Impakt) auf die Bauteiloberfläche ausgeführt. Dieser erzeugt einen mechanischen Impuls, der sich als akustische Welle im Material fortpflanzt. Ein Empfänger (Piezomikrofon), untergebracht in dem Revolver-Transducer (Detail 1 in Bild 4), der während der Messung unmittelbar an der Anregungsstelle angeordnet ist, nimmt die aus verschiedenen Tiefen mehrfach reflektierten Wellen auf und stellt sie dem AD-Wandler (Detail 3 in Bild 4) zur Verfügung. Der AD-Wandler digitalisiert die analogen Werte und übergibt diese dem Messrechner (Detail 4 in Bild 4) [2,5].

Im Erfassungs- und Auswerterechner wird eine Fast Fouriertransformations-Analyse (FFT-Analyse) durchgeführt.

Aus den FFT-Amplitudenspitzen (Frequenzmaximum) kann bei bekannter Schallwellengeschwindigkeit auf die Tiefenlage der Veränderung im Prüfkörper geschlossen werden.

Da das empfangene Impakt-Echo-Signal und das dazugehörige Frequenzspektrum sofort nach der



Bild 4: Impakt-Echo Messgerät

Messung zusammen angezeigt werden, kann immer eine Aussage über die Qualität der gerade erfolgten Messung gemacht werden. Von Materialänderungen im Prüfteil, einbetonierten Fremdstoffen, wird je nach Größe und Art der Störung ein Teil der Körperschallwelle reflektiert. Luft stellt den besten Reflektor dar.

In den Bildern 5 bis 7 ist das Messprinzip dargestellt. [2]. Der Stoß (Impakt) mit der Stahlkugel ist durch den Pfeil mit der Beschriftung „Anregung“ markiert. Daneben befindet sich der Empfänger. Dieser leitet das aufgenommene Impakt-Echo-Signal an die Datenerfassung weiter. Die linke untere Darstellung ist das Impakt-Echo-Signal im Zeitbereich und daneben das errechnete Frequenzspektrum.

Bild 6 (a, b, c) zeigt die Messung an einer Betonplatte ohne Fehlstelle.

- In Bild 6 a ist die Impaktauslösung mit der Stahlkugel und Empfang des Rückwand-Echo-Signals dargestellt.
- Bild 6 b zeigt das Impakt-Echo-Signal im Zeitbereich.
- In Bild 6 c ist das Frequenzspektrum dargestellt, wobei f_T ($f_T = 1/t_T$) die Dickenfrequenz (thickness frequency) bedeutet.

Bild 6 (d, e, f) zeigt die Messung an einer Betonplatte mit einer lateral kleinen Fehlstelle.

- In Bild 6 d ist zu erkennen, dass ein Teil der Schallwelle von der Fehlstelle und ein Teil von der Rückwand reflektiert wird, wobei die Schallwelle von der Rückwand eine zeitliche Verzögerung durch die Umleitung um die Fehlstelle erfährt. Es wird, wenn die laterale Ausdehnung größer oder gleich der Wellenlänge ist und der Abstand d von der Oberfläche ($2d$) der Wellenlänge λ entspricht, durch den Frequenzpeak eine Fehlstelle (hier eine Hohlstelle) angezeigt.

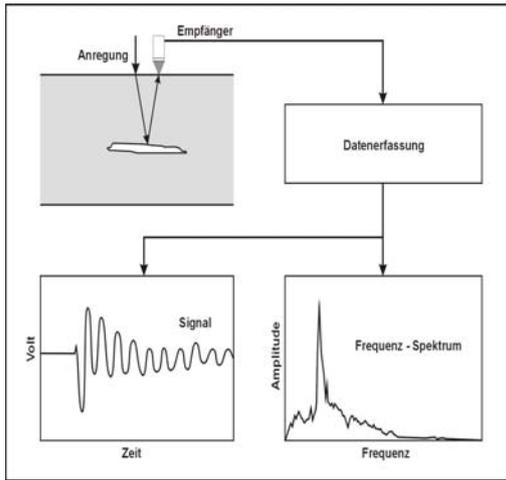


Bild 5: Messprinzip [2]

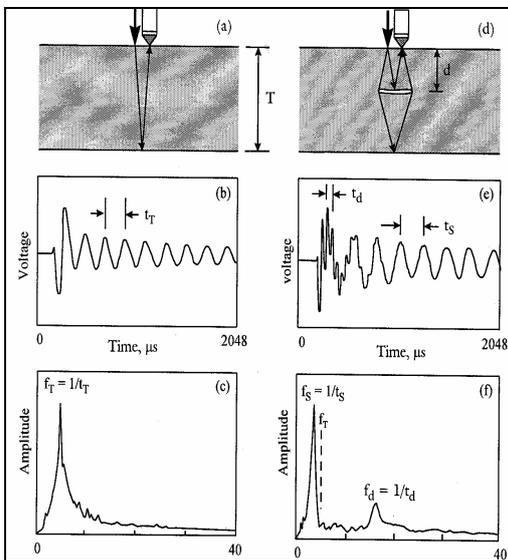


Bild 6: Messung an einer intakten Betonplatte, Darstellung a, b, c und einer Betonplatte mit einer kleinflächigen Hohlstelle, Darstellung d, e, f [2]

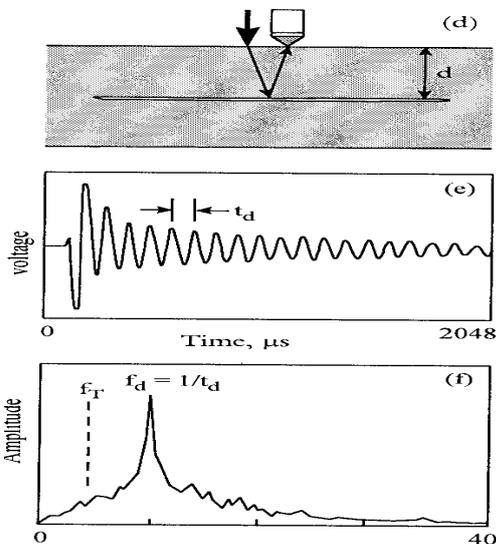


Bild 7: Messung an einer Betonplatte mit einer großflächigen Hohlstelle [2]

- In Bild 6 e sind beim Impakt-Echo-Signal im Zeitbereich die Frequenz-Überlagerungen zu erkennen.
- In Bild 6 f ist am ersten Peak f_S ($f_S=1/t_S$) die zu kleineren Frequenzen hin verschobene Rückwand-Echo-Frequenz zu erkennen. Ursache hierfür ist die längere Laufzeit durch die Ablenkung an der Fehlstelle (Bild 6 d). Die gestrichelte Linie markiert die eigentliche Rückwand-Echo-Frequenz. Der zweite kleinere Peak f_d ($f_d=1/t_d$) stammt von der Echo-Frequenz der Fehlstelle. Die höhere Frequenz resultiert aus der geringeren Laufzeit.

Bild 7 (d, e, f) zeigt die Messung an einer Betonplatte mit einer lateral großen Fehlstelle.

- In Bild 7 d ist die Impaktauslösung mit der Stahlkugel und Empfang des Fehlstellen-Echo-Signals dargestellt. Das Echosignal wird komplett von der Fehlstelle reflektiert. Es ist kein Rückwandecho vorhanden.
- Bild 7 e zeigt das Impakt-Echo-Signal im Zeitbereich.
- In Bild 7 f markiert die gestrichelte Linie f_T die eigentliche Rückwand-Echo-Frequenz. Die laterale Ausdehnung der Fehlstelle ist so groß, dass keine direkte Rückwand-Echo-Frequenz beobachtet wird. Der vorhandene große Peak f_d ($f_d=1/t_d$) stammt von der Echo-Frequenz der Fehlstelle (Hohlstelle).

Ist die Schallgeschwindigkeit v bekannt (ein guter Mittelwert von v für Beton ist 4000 m/s), kann die Tiefenlage d eines Reflektors (eingeschlossene Luft, Kies oder andere Fremdkörper mit der oben beschriebenen Ausdehnung) über die einfache Beziehung $d=v/(2f)$ einer Frequenzanzeige f (Frequenzmaximum der FFT-Analyse) zugeordnet werden, siehe Bild 6 d. Die Dicke eines Prüfkörpers berechnet sich nach $T=v/(2f)$, vgl. Bild 6 a.

4.2 Messgenauigkeit

Der Messfehler setzt sich aus 3 Einzelfehlern zusammen:

- Gerätebedingter Fehler. Dieser lässt sich relativ einfach beschreiben. Er hängt im wesentlichen von der gewählten Frequenzauflösung ab:

$$E_f = \Delta f / 2f * 100 \text{ [%]}$$

E_f = Fehler in Prozent

$$\Delta f = 1/n * \Delta t$$

f = Dickenfrequenz (thickness frequency)

n = Anzahl der erfassten Werte (Samples) pro Einzelmessung

Δt = Zeit zwischen den einzelnen Abtastungen (Abtastrate).

Bei der Kalibrierung am Tunnel-Probekörper, mit der Dicke von 328 mm, ergab sich eine Dickenfrequenz von 6,3 kHz. Die Abtastrate betrug $2 \mu\text{s}$ und die Speichertiefe betrug 2048 Messwerte.

$$E_f = \pm (1/2048 * 2 * 10^{-6}) / 2 * 6,3 * 10^3 = \pm 1,9 \% \\ \approx \pm 6,5 \text{ mm}$$

- Fehler aus der Bestimmung der Körperschallgeschwindigkeit.
Diese wird bei der Kalibrierung ermittelt. Die Körperschallgeschwindigkeit hängt stark von der Schwankung der Betonqualität ab (insbesondere durch Konzentration von Zuschlagskörnern durch Entmischungserscheinungen). Üblicherweise liegt der Fehler bei ca. $\pm 2 - 3 \%$. In Ausnahmefällen kann der Fehler bei bis zu $\pm 5 \%$ liegen, z.B. bei Betonentmischungen. Bei der Kalibrierung ist besonders große Sorgfalt geboten, denn die falsche Dickenfrequenz beeinflusst die Messgenauigkeit. Es ist sinnvoll, die Kalibrierung an einem aus gleichem Beton hergestellten Probekörper vorzunehmen. Zur Vermeidung von Randeffekten werden folgende Abmessungen des Probekörpers empfohlen: [L/B/T] (1,0 m x 1,0 m x 0,30 m).
- Fehler bei der Auswertung.
Hier können Fehler beim Auswählen des Frequenzmaximums (Dickenpeaks) auftreten, die jedoch prozentual gering sind. Nimmt man die oben genannten Fehler zusammen, so ergibt sich eine Messgenauigkeit von ca. $\pm 3 - 5 \%$.

5 Durchführung der Messung

5.1 Impakt-Echo-Messung

Die Messungen wurden im Dezember 2003 durchgeführt. Es stand ein Kettenfahrzeug als Hubsteiger zur Verfügung (Bild 8). Der Zeitraum von 28 Tagen nach der Herstellung der Tunnelinnenschalen für das Erhärten des Betons wurde eingehalten. Der Beton hat die Festigkeitsklasse C 25/30. Die Sollstärke der Tunnelinnenschale beträgt 35 cm. Die Bewehrung hat einen Durchmesser von 8 bis 10 mm, liegt in einem Raster von 15 cm, hat eine bergseitige und luftseitige Lage und ist als Korb ausgebildet.

Die Messung begann am Block 138.2 an der Blockfuge 138.2/139.2 in Fahrtrichtung. Die Blickrichtung, ist in diesem Fall die abfallende Zählrichtung der Blocknummern.



Bild 8: Korb des Hubsteigers, der als Messplattform benutzt wurde

5.2 Kalibrierung

Die Kalibrierung erfolgte am Probekörper (PK), der mit der gleichen Betonrezeptur der Tunnelinnenschale angefertigt worden war (Bild 9). Die Dicke des PK betrug 328 mm. Die Abtastrate war festgelegt mit $2 \mu\text{s}$. Die Impakt-Kugel mit dem Durchmesser von 9,5 mm wurde gewählt. Die gemessene Körperschall-Wellengeschwindigkeit (Wave Speed) ergab 4133 m/s und die Dickenfrequenz 6.3 kHz. Mit diesen Parametern wurden die gesamten Messungen durchgeführt. Im Bankettbereich kam auch die Impakt-Kugel mit dem Durchmesser von 15 mm teilweise zum Einsatz. Die Abmessungen des PK waren zwar nicht ideal (100 cm x 50 cm x 32,8 cm), mehrere Wiederholungsmessungen in der Mitte des PK ergaben jedoch die gleichen Messwerte, somit war der PK zum Kalibrieren geeignet.

In den drei Blöcken wurde an den Fugen 138.2/139.2; 137.2/138.2; 136.2/137.2 jeweils in der Firste eine Stahlplatte mit den Maßen 50 cm x 50 cm x 0,03 cm vor dem Betonieren der Tunnelinnenschalen an die Kunststoffdichtungsbahn geklebt. An diesen Stellen sollten Kernbohrungen durchgeführt werden, um Untersuchungen seitens der Bauaufsicht im Fugenbereich durchzuführen. Gleichzeitig sollten hier auch die Kalibrierungen der oben genannten Messgeräte vorgenommen werden. An der Blockfuge 137.2/138.2 war bei Beginn der Messungen eine Kernbohrung vorhanden (Bild 10). Bei näherer Untersuchung stellte sich heraus, dass kein Verbund zwischen Betonoberfläche und Stahlplatte vorhanden war. An der Oberfläche des Betons befanden sich Betonbruchstücke und Betongrieß. Wie die Oberfläche des Betons in 10 cm oder 20 cm Entfernung von der Bohrlochwand zum Zeitpunkt der Messung aussah, konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Für eine Kalibrierung muss die Rückseite eines nur einseitig zugänglichen Prüfkörpers eben sein (Bild 15 u. 16). Somit war eine genaue Kalibrierung hier nicht möglich.



Bild 9: Kalibrierkörper - Tunnel Burgholz



Bild 10: Block 137.2, Bohrloch an der Stahlplatte

5.3 Videoscopeaufnahmen

Die Firma Bilfinger Berger, die auch zu dem Messteam gehörte, stellte ein Videoscope zur Verfügung und erstellte einige Aufnahmen durch die Kernbohrungen und die Nachfüllstutzen der Blöcke 136.2 und 137.2. Von der Fehlstelle im Block 136.2 am Rastermesspunkt 732 auf den Bildern 11 bis 14 ist deutlich die freiliegende Bewehrung und die Unebenheit der Betonoberfläche zu erkennen. Auf den von der Kernbohrung in Block 137.2 am Rasterpunkt 330 gemachten Aufnahmen (Bilder 15 und 16) ist deutlich der fehlende Verbund Betonoberkante/ Abdichtung und die Unebenheit der Betonoberfläche zu erkennen. Ein korrektes Kalibrieren war auch hier nicht möglich.



Bild 11: Block 136.2, Videoscope-Aufnahme durch den Firstspaltinjektionsstutzen nahe des Rasterpunktes 732



Bild 12: Block 136.2, Videoscope-Aufnahme durch den Firstspaltinjektionsstutzen nahe des Rasterpunktes 732



Bild 13: Block 136.2, Videoscope-Aufnahme durch den Firstspaltinjektionsstutzen nahe des Rasterpunktes 732



Bild 14: Block 136.2, Videoscope-Aufnahme durch den Firstspaltinjektionsstutzen nahe des Rasterpunktes 732



Bild 15: Block 137.2, Videoscope-Aufnahme durch den Firstspaltinjektionsstutzen nahe des Rasterpunktes 330



Bild 16: Block 137.2, Videoscope-Aufnahme durch den Firstspaltinjektionsstutzen nahe des Rasterpunktes 330

6 Auswertung der Messwerte

6.1 Flächendarstellung

Im ersten Messdurchlauf sollte festgestellt werden, ob die Messwerte der einzelnen Messteams gleiche Resultate ergaben. Durch das vor Beginn der Messung auf den Tunnelinnenschalen-Blöcken 138.2 und 137.2 aufgetragene Messraster und die vorgenommene Numerierung war sichergestellt, dass alle Messteams an den gleichen Messpunkten ihre Messungen durchführen konnten. Die farbige grafische Darstellung der Messwerte (Dicken der Tunnelinnenschale) erfolgte blockweise in der H-Form als Abbild des aufgetragenen Messrasters nach RI-ZFP-TU. Block 138.2 in Bild 17, Block 137.2 in Bild 18, Block 136.2 in Bild 19 sind als Höhenliniengrafik abgebildet. Die Farbskala [m] gibt die jeweiligen Dickenbereiche der Tunnelinnenschale wieder. Diese Darstellungen sind exemplarisch und gelten auch für die Messwertdarstellungen der anderen Messteams.

Im Block 136.2 wurden im Firstbereich an der Blockfuge 136.2/135.2 deutliche Minderdicken festgestellt (Solldicke = 0,35m). In Bild 19 ist die Ausdehnung der Fehlstelle deutlich zu erkennen. Es wurden hier, wie vorgeschrieben, Messungen mit einem dichteren Raster von 40 cm durchgeführt. An einigen Punkten wurden Minderdicken bis zu 22,3 cm gefunden.

Die an den anderen Blöcken vereinzelt noch auftretenden geringen Abweichungen von der Solldicke waren nur punktweise und nicht in der Fläche nachzuweisen, so dass man davon ausgehen kann, dass diese nach erfolgter Injektion nicht mehr vorhanden waren.

6.2 Vergleich der Impakt-Echo-Messwerte

In Bild 20 sind die Messwerte der einzelnen Messteams vom Block 136.2 vom Profil 0,00 in

der Firste als Graph parallel aufgetragen. Vernachlässigt man den einen vermuteten Ausreißer, liegen die Impakt-Echo-Messwerte alle dicht zusammen. Deutlich ist der Abfall der Dicke der Tunnelinnenschale bei der Blocklänge von ca. 7,80 m zu erkennen. Hier beginnt die Minderdicke. Die ausgeprägteste Minderdicke ist bei der Blocklängenkoordinate von 9,00 m deutlich zu erkennen. Als Mittelwert der Streuung aller Messwerte der einzelnen Teams wurde 7,6 mm gefunden. Der größte Wert der Abweichung betrug 16,5 mm, der kleinste Wert 1,7 mm. Die Ultraschall-Echo-Messwerte werden in Kapitel 7 beschrieben.

In Bild 21 sind die Messwerte der einzelnen Messteams vom Block 136.2 radial vom Profil bei der Blocklänge 9,00 m aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass bei ca. -3,00 m die Minderdicke beginnt, in der Firste bei 0,00 m den niedrigsten Wert von 22,3 mm erreicht und bei ca. 2,00 m endet. Der Mittelwert der Streuung betrug 9,0 mm. Der größte Wert wurde mit 19,6 mm und der kleinste Wert mit 3,1 mm berechnet und dargestellt in Bild 21, Tabelle Impakt-Echo. Die Abweichungen der Messwerte der einzelnen Messteams liegen im Bereich der Messwertgenauigkeit von ca. $\pm 3-5\%$.

In der Tabelle 1 sind die Mittelwerte aller Vergleichsmessungen der radialen Messpunkte aufgeführt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Streuung am Profil der Messlinie 0,20 m und 9,80 m, die jeweils an den Fugen liegen, größer sind als die Streuung an den Profilen 1,00 m und 9,00 m. Der Einfluß des Fugenbandes und der Fuge selbst ist in diesem Bereich groß. Es ist sinnvoll, bei auftretenden Problemen bei der Interpretation der Messsignale während der Messung vor Ort den Messpunkt ein wenig zu verschieben und die Messung zu wiederholen. In sehr vielen Fällen führte dies zum Erfolg und die Messsignale konnten gut interpretiert werden. Versuchsmessungen mit geringerem Messabstand zur Blockfuge als 0,20 m brachten keinen Erfolg, da der Einfluß der Blockfuge und des Fugenbandes die Auswertung der Messwertsignale schwierig machte und teilweise zu falschen Ergebnissen führte.

In Tabelle 2 sind die Mittelwerte der Streuung aller Vergleichsmessungen im Firstbereich dargestellt. Hier liegen die Streuungen auch alle im Bereich der Messgenauigkeit. Durch diese Vergleichsmessungen ist nachgewiesen und dargestellt, dass die Messungen der verschiedenen Messteams im Rahmen der Genauigkeit der Impakt-Echo-Messmethode vergleichbare Ergebnisse erzielt haben.

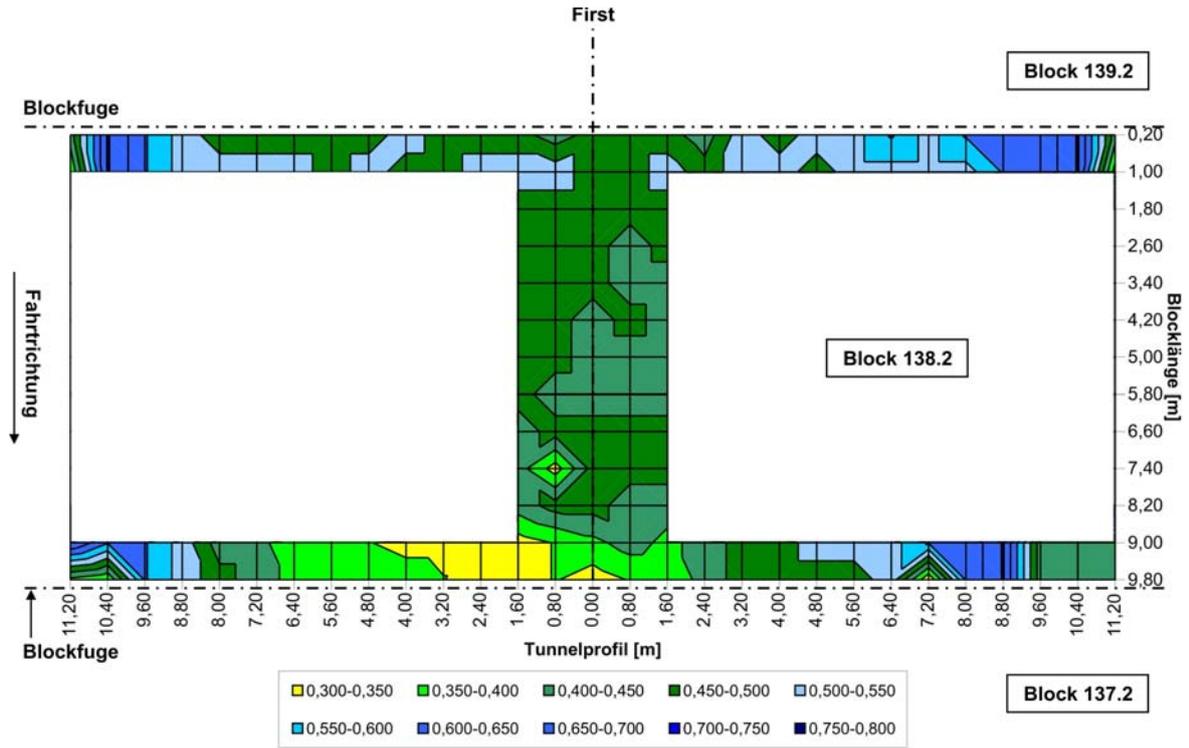


Bild 17: Block 138.2, flächige Darstellung der Messwerte

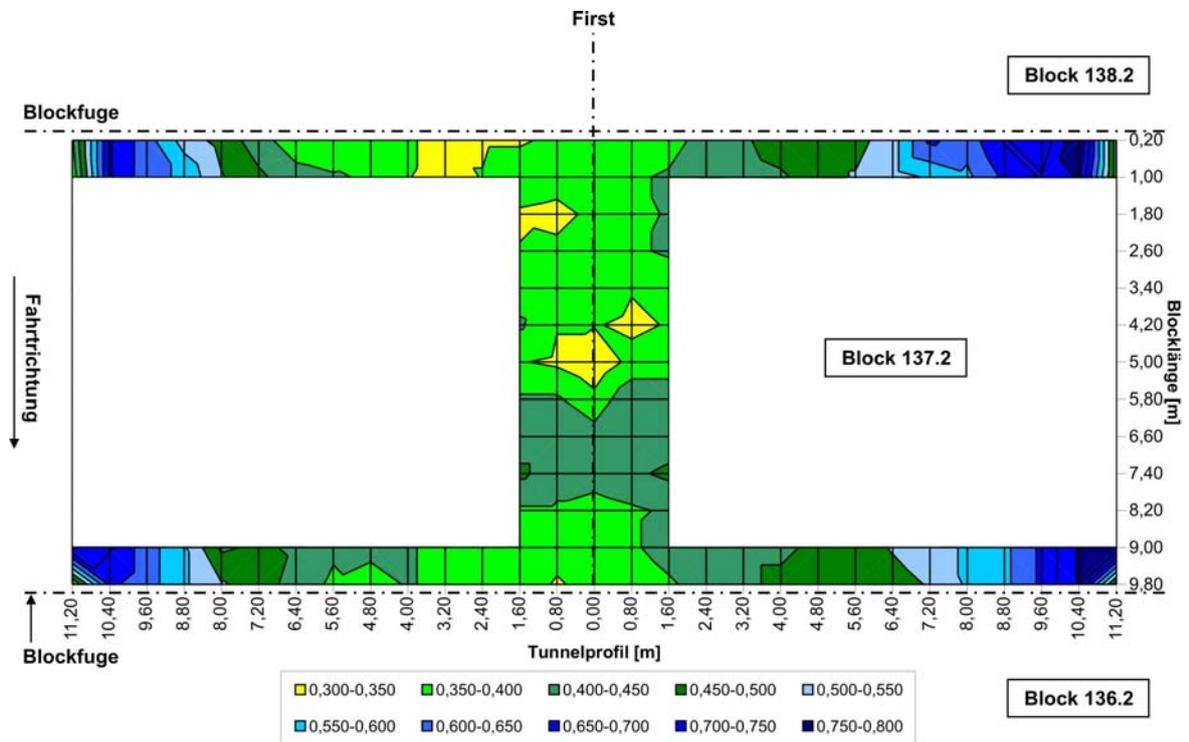


Bild 18: Block 137.2, flächige Darstellung der Messwerte

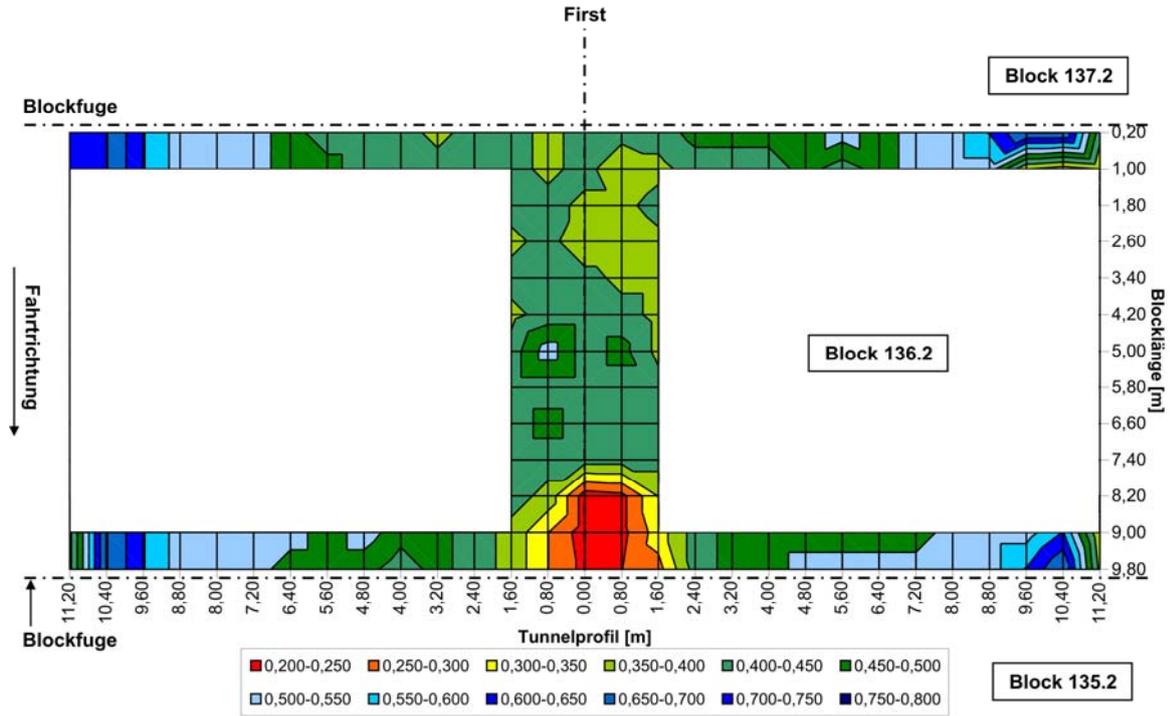


Bild 19: Block 136.2, flächige Darstellung der Messwerte.

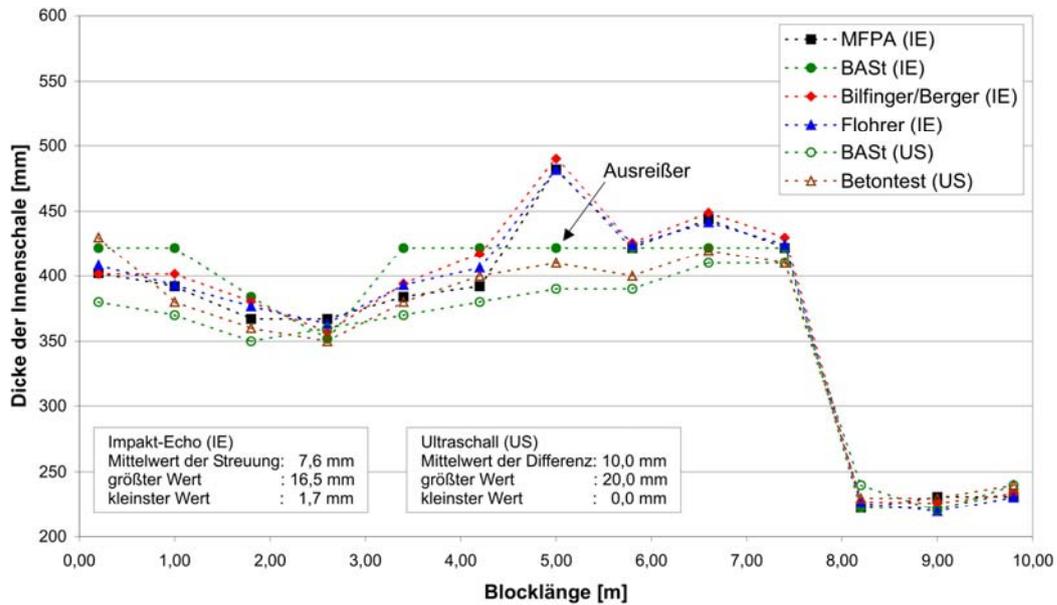


Bild 20: Block 136.2 Profil 0,00 m Firste, Vergleich der Impakt-Echo- (IE) und Ultraschall-Messungen (US)

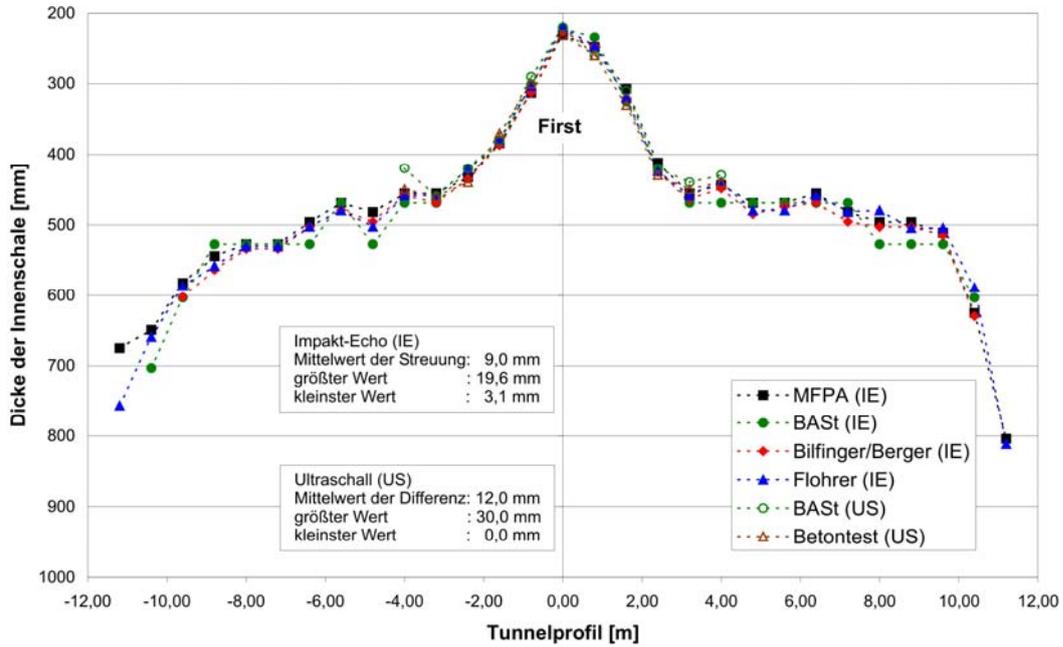


Bild 21: Block 136.2 Profil bei Blocklänge 9,00 m, radial an der Blockfuge, Vergleich der Impakt-Echo- (IE) und Ultraschall-Messungen (US)

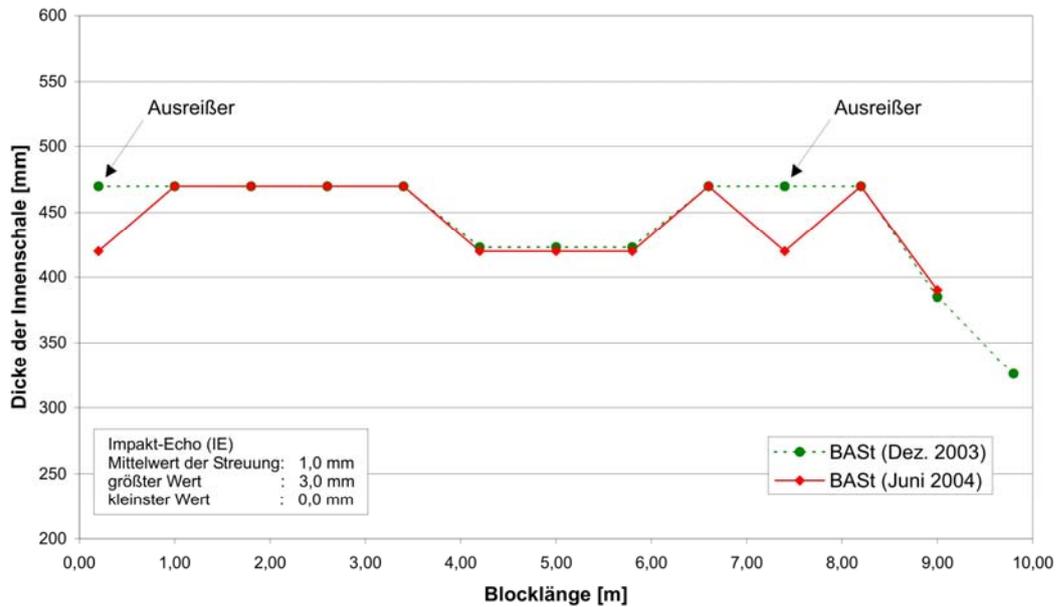


Bild 22: Block 138.2 Profil 0,00 m Firste. Vergleich der Impakt-Echo Messung (IE) vom Dezember 2003 mit der Wiederholungsmessung vom Juni 2004

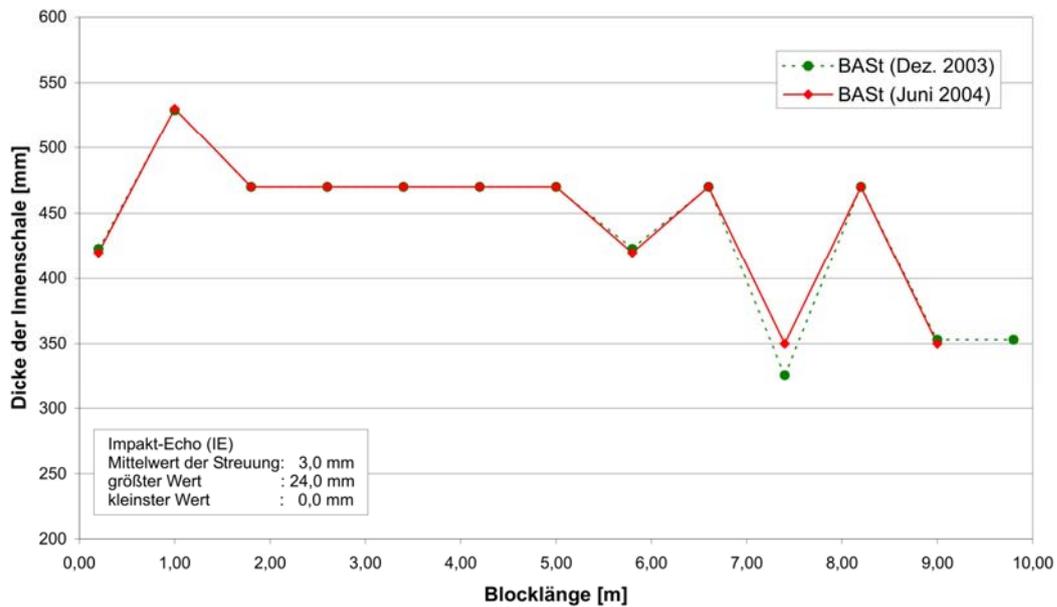


Bild 23: Block 138.2 Profil -0,80 m Firstbereich. Vergleich der Impakt-Echo Messung (IE) vom Dezember 2003 mit der Wiederholungsmessung vom Juni 2004.

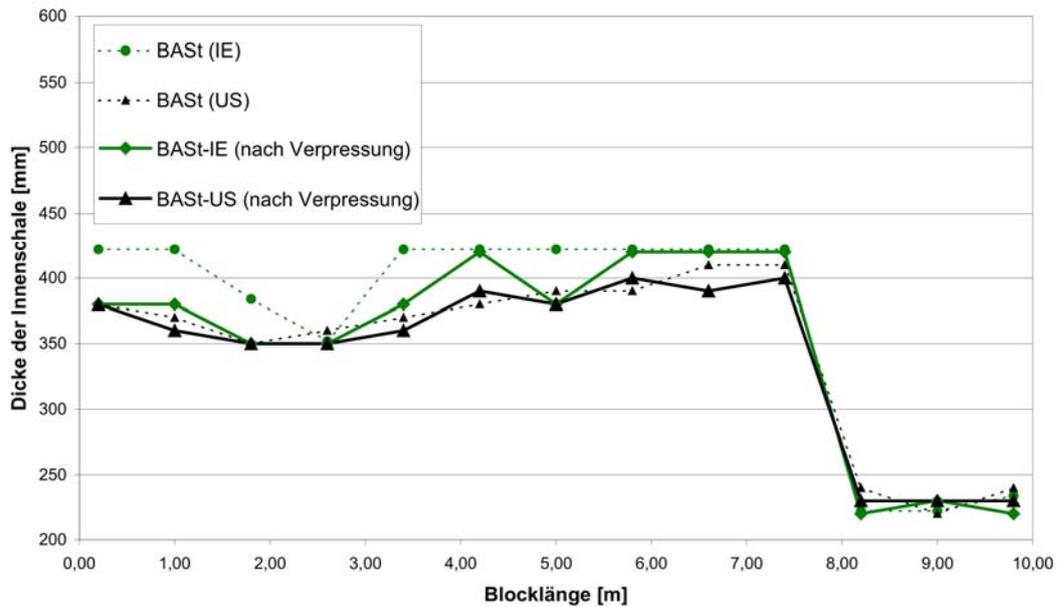


Bild 24: Block 136.2 Profil 0,00 m Firste, Vergleich der Impakt-Echo- (IE) und Ultraschall-Messung (US) vor und nach der Injektion.

Tab. 1: Mittelwerte der Streuung der Vergleichsmessung an den Blockfugen

Profil	Block	Block	Block
	138.2	137.2	136.2
[m]	[mm]	[mm]	[mm]
0,20	18	16	11
1,00	11	8	11
9,00	9	8	10
9,80	16	15	18

Tab. 2: Mittelwerte der Streuung der Vergleichsmessung im Firstbereich

Profil	Block	Block	Block
	138.2	137.2	136.2
[m]	[mm]	[mm]	[mm]
+1,60	10.3	7	9.3
+0,80	10.4	7	7.7
+0,0	8.6	6.5	7.6
-0,80	13.6	5	8.7
-1,60	9	11	7.9

Tab. 3: Mittelwert der Differenz der Erstmessung zur Wiederholungsmessung im Firstbereich

Profil	Block	Block
	138.2	137.2
[m]	[mm]	[mm]
+0,0	1	11
-0,80	24	10

6.3 Wiederholungsmessung

Im Juni 2004, ein halbes Jahr nach der Erstmessung, wurde von der BAST an den Blöcken 138.2 und 137.2 (jeweils die Profile 0,00 m und -0,80 m) eine Wiederholungsmessung durchgeführt. Es sollte festgestellt werden, ob sich nach der Erhärtungszeit von 6 Monaten die Schallschwellengeschwindigkeit erheblich ändert. Die Feuchtigkeit und Festigkeit des Betons beeinflusst diese. Von Block 138.2 ist in Bild 22 das Profil 0,00 m und in Bild 23 das Profil -0,80 m von der Erstmessung im Dezember 2003 und der Wiederholungsmessung im Juni 2004 jeweils gemeinsam exemplarisch dargestellt. Sieht man von den beiden Ausreißern in Bild 22 ab, liegen die Messwerte alle sehr dicht zusammen.

In der Tabelle 3 sind die Mittelwerte der Differenzen der Erstmessung zur Wiederholungsmessung im Firstbereich eingetragen. Eine gleichmäßige systematische Differenz der Messwerte Bild 22 und Bild 23 ist nicht zu

erkennen. Daraus kann man schließen, dass sich die Schallschwellengeschwindigkeit nach dieser Festigkeits- und Gefügeentwicklung des Betons der Tunnelinnenschale nicht mehr erheblich verändert hat. Die relativ stabilen klimatischen Bedingungen in der Tunnelröhre verhindern wahrscheinlich ein weiteres Erhärten (Abbinden) des Betons. Ein Feuchteausgleich mit der Umgebung hat somit stattgefunden.

Die Nachmessung an dem Burgholz-Tunnel-Probekörper, der in der Halle 7 der BAST lagert, hat jedoch ergeben, dass sich hier die Körperschallschwellengeschwindigkeit für Impakt-Echo und Ultraschall-Echo um 8 % vergrößert hat. Diese signifikante Änderung der Körperschallschwellengeschwindigkeit ist vermutlich auf die halbjährliche Lagerung in der sehr trockenen, warmen Umgebung der Halle 7 zurückzuführen.

6.4 Messung nach der Injektion

Im Oktober 2004 wurden nach der Injektion und der vorgeschriebenen Erhärtungszeit für das Injektionsgut in einem zweiten Durchlauf Impakt-Echo- und Ultraschall-Echo-Messungen durchgeführt. Die Nachmessungen ergaben in Block 136.2 an der bekannten Fehlstelle (Hohlstelle), dass das Injektionsgut hier nicht nachzuweisen war. In Bild 24 sind die Messwerte des Profils 0,00 m in der Firste vor und nach der Injektion jeweils in einer grafischen Darstellung aufgetragen. Es ist deutlich zu erkennen, dass keine wesentlichen Änderungen in der grafischen Darstellung, welche den Verlauf der Dicken darstellen, zu erkennen sind. Alle an den Messungen beteiligten Messteams erzielten vergleichbare Messergebnisse.

7 Ultraschall-Echo-Messverfahren

7.1 Funktionsweise

Von zwei Messteams, der Firma Betontest, Darmstadt, und der BAST, Bergisch Gladbach, wurden Ultraschall-Messungen durchgeführt. Beide Teams verwendeten das Messgerät „Low Frequency Ultraschall Flaw Detector A1220“ von der Firma MSIA Spectrum, Acoustics Control Systems Ltd., Moskau [6].

Das Gerät arbeitet nach dem Ultraschall-Echo-Verfahren mit einer Frequenz von 55 kHz. Es besteht aus der Erfassungseinheit (Bild 25 Detail 1) und einer Sende- und Empfangseinheit (Bild 25 Detail 2). An der Unterseite der Sende- und Empfangseinheit befinden sich 24 gefederte Tastspitzen (Ultraschallmessköpfe). Davon sind 12 Tastspitzen als Sender und 12 Tastspitzen als Empfänger ausgelegt und je in einer Gruppe zu-

sammengefaßt. Beim Messen wird die Sende- und Empfangseinheit auf das Meßobjekt, die Bauteiloberfläche, gedrückt, so dass alle Tastspitzen die Oberfläche gleichmäßig und punktförmig kontaktieren. Ein Koppelmittel, wie es bei anderen Ultraschallköpfen nötig ist, ist nicht erforderlich. Nach Auslösen der Messung senden 12 Tastspitzen das Ultraschallsignal aus und 12 Tastspitzen empfangen das Echosignal.

Die Anordnung der Sende- und Empfangstastspitzen als Feld bedingt weiterhin, dass die sich von den Sendeköpfen kugelförmig ausbreitenden Ultraschallwellen im zu prüfenden Bauteil zu einer transversalen Wellenfront vereinigen. Diese Wellenfront breitet sich mit der Schallwellengeschwindigkeit c_T aus und wird an Schichtgrenzen und möglichen Störungen und an der Rückwand des zu prüfenden Bauteils reflektiert.

Über den Zusammenhang zwischen Laufzeit und Schallwellengeschwindigkeit kann auf die Bauteildicke bzw. die Tiefenlage einer Störung geschlossen werden. Der formale Zusammenhang ergibt sich wie folgt:

$$D = c_T \cdot T / 2$$

D = Bauteildicke (Tiefe der Störung)

c_T = Schallwellengeschwindigkeit

T = Laufzeit

In Bild 26 ist exemplarisch ein A-Bild von einer Referenzmessung bei einer Dicke von 300 mm dargestellt. Der Amplitudenpeak des Echosignals, der der Rückwand zuzuordnen ist, zeigt eine Tiefenlage von 305,5 mm. Dieser Wert weicht nur geringfügig von der tatsächlichen Dicke von 300 mm ab.

Die Abweichung von 1,8 % der tatsächlichen Dicke 300 mm ließe sich durch eine Änderung der eingestellten Schallgeschwindigkeit unterdrücken. Wegen der betontypischen Variation der Schallgeschwindigkeit wurde diese Korrektur allerdings nicht durchgeführt.

7.2 Durchführung der Messung

Im Gegensatz zu den Impakt-Echo-Messungen, die genau auf den vordefinierten Punkten des Meßrasters erfolgten (Punktmessung) und nur bei Auffälligkeiten der Meßwerte in einem verdichteten Raster (nach RI-ZFP-TU) durchgeführt wurden, wurden die Ultraschall-Messpunkte dichter gelegt. Um eine höhere Meßgenauigkeit zu erzielen, wurden jeweils zwischen den Punkten des vorgeschriebenen Messrasters weitere Messungen durchgeführt. Die Firma Betontest legte zwischen den Punkten einer Messlinie des vorgeschriebenen Messrasters alle 10 cm zusätzliche Messpunkte. Die BASt führte alle 20 cm zusätzliche Messungen durch.

7.3 Darstellung der Messwerte

In Bild 27 ist vom Block 136.2 die Messlinie im Firstbereich bei 9,60 m als B-Bild dargestellt. Ein B-Bild entspricht einem Vertikalschnitt des zu untersuchenden Objektes. Deutlich ist die Minderdicke am Verlauf der dunklen gekrümmten Linie zu verfolgen. In der Firste, bei 0,00 m auf der x-Achse, ist die Minderdicke von 0,23 m zu erkennen. Die dunklen Balkenlinien im oberen Bereich, y-Achse 0,00 m bis 0,10 m, stammen von den Reflexionen an der Blockfuge und haben für die Auswertung keine Bedeutung.



Bild 25: Ultraschall-Messgerät

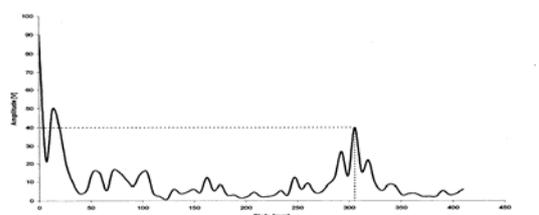


Bild 26: A-Bild einer Referenzmessung bei einer Tiefe von 300 mm

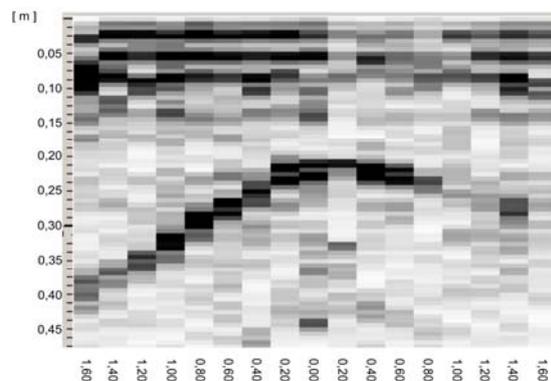


Bild 27: Block 136.2, im Firstbereich bei der Blocklänge 9,60 m. Ultraschall, B-Bild von der Minderdicke der Fehlstelle.

In Bild 20 sind die Ultraschall-Echo-Messwerte von Block 136.2 Profil 0,00 (Firste) zusammen

mit den Impakt-Echo Messwerten aufgetragen. Die Messwerte der Ultraschall-Echo-Messungen (BAST und Betontest) verlaufen, bis auf geringe Abweichungen (Messungenauigkeit, unterschiedliche Kalibrierung), parallel. Sie sind somit untereinander vergleichbar. Beide Messteams haben die Minderdicke der Fehlstelle am Messpunkt bei der Blocklänge 8,20 m detektiert.

Bei den Ultraschall-Echo-Messungen wurde ein Mittelwert der Streuung der Meßwerte beider Meßteams von 10 mm gefunden (Bild 20). Der größte Wert betrug 20 mm, der kleinste Wert 0 mm. Die Abweichungen der Messwerte der beiden Messteams liegen somit im Bereich der Messwertungenauigkeit von ca. $\pm 3-5\%$.

In Bild 21 sind ebenfalls die Ultraschall-Echo-Messwerte von Block 136.2 bei der Blocklänge 9,00 m radial an der Blockfuge zusammen mit den Impakt-Echo-Messwerten aufgetragen. Die Messwerte der Ultraschall-Echo-Messungen (BAST und Betontest) verlaufen, bis auf geringe Abweichungen (Messungenauigkeit, unterschiedliche Kalibrierung), auch hier parallel und sind somit untereinander vergleichbar. Auch hier ist deutlich die Minderdicke der Fehlstelle beim Profil 0,00 (Firste) bei der Blocklänge 9,00 m radial mit 0,23 m zu erkennen. Für die US-Messungen wurde der Mittelwert der Streuung mit 12 mm, der größte Wert mit 30 mm und der kleinste Wert mit 0 mm ermittelt (Bild 21). Die Abweichungen der Messwerte der beiden Messteams liegen auch hier im Bereich der Messwertungenauigkeit von ca. $\pm 3-5\%$.

8 Radar-Impuls-Messverfahren

8.1 Funktionsweise

Das Radar-Impuls-Messverfahren beruht auf der Aussendung hochfrequenter elektromagnetischer Impulse in das zu untersuchende Medium und der Messung des Rückstreu-Impulses. Der mittels einer Sendeantenne eingestrahlte Impuls, in diesem Fall mit der Frequenz von etwa 1 GHz, bewegt sich im Medium mit einer materialabhängigen Geschwindigkeit v , die umgekehrt proportional zur Wurzel der Dielektrizitätskonstante ϵ des Mediums ist: $v=c/\sqrt{\epsilon}$ [5,7].

v = Ausbreitungsgeschwindigkeit der elektromagnetischen Wellen

c = Lichtgeschwindigkeit in Vakuum (300.000 km/s)

ϵ = Dielektrizitätskonstante

Einige Dielektrizitätskonstanten sind:

Luft	= 1
Trockener Beton	= 5 – 7
Feuchter Beton	= 8 – 16
Wasser	= 80.

Beim Übergang der Welle von einer Schicht in eine andere Schicht mit anderer Dielektrizitätskonstante ϵ und elektrischer Leitfähigkeit σ wird ein Teil der einfallenden elektromagnetischen Wellen reflektiert. Die an Diskontinuität reflektierten elektromagnetischen Wellen werden mit der Empfangsantenne registriert und zeitaufgelöst auf einem Display dargestellt. Die Antenne sendet kurze Impulse (Wellenzüge) von ca. 1 ns in das Material aus. Unterschiedliche Signallaufzeiten entsprechen dabei unterschiedlichen Tiefen, so dass eine Tiefenauflösung möglich ist. Aus der Laufzeit des in einer Empfängerantenne gemessenen „Echos“ kann mit Kenntnis der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen die Tiefe des Reflektors bestimmt werden.

Mit einer 1 GHz-Antenne erreicht man eine Eindringtiefe von ca. 0,5 m bis 1 m in einem in der Festigkeits- und Gefügeentwicklung abgeschlossenen Beton. Die gemessenen Radar-Reflexionssignale eines Linienscans werden von dem Gerät als B-Scan wiedergegeben, die einem Tiefenprofil entlang der Messlinien-Fahrt entspricht. Bild 28 zeigt exemplarisch einen Scan und stellt die Auswertung dar. Das A-Bild ist die Kurvendarstellung des aufgenommenen Radar-Reflexionssignals S als Funktion der Laufzeit bzw. der Tiefe z , d. h. $S(z)$ bei festem Ort x_0, y_0 .

Mit B-Bild bezeichnet man die flächenhafte Farb- oder Graustufen-Darstellung vieler A-Bilder eines Scans, d. h. $S(x, z, y)$ bei festem y_0 . Das B-Bild entspricht einem Vertikalschnitt des zu untersuchenden Objektes.

Das C-Bild ist die flächenhafte Darstellung aller Radar-Impuls-Echos fester Laufzeit, d.h. $S(x, y)$ bei festem z_0 . Damit entspricht das C-Bild einem Schnittbild in der Tiefe z_0 parallel zur Oberfläche.

Reflektierende Strukturen quer zur Scan-Richtung, z. B. Armierungs-Stähle, Spannglieder, Dübel oder Anker im Beton, sind anhand ihrer charakteristischen Signahyperbeln im B-Scan zu erkennen und zu orten.

In Bild 29 ist das Zustandekommen der charakteristischen Rückstreuhyperbeln im B-Scan dargestellt. Bei Annäherung des Radars an den Reflektor verkürzt sich die Laufzeit. Sie ist minimal genau über dem Reflektor ($x=0$) und verlängert sich mit wachsender Entfernung x vom Streuer.

In Bild 30 ist der Antennen-Messkopf eines bei den Messungen eingesetzten Geo-Radar-Systems exemplarisch dargestellt. Er enthält eine bistatische Sende-Empfangs-Antennen-Kombination und wird mit Hilfe eines Handgriffes über Objekt gezogen. Das vorne angebrachte Drehgeber-Rad zeichnet die Ortskoordinate des Scans auf und löst alle 10 mm eine Radar-Impulsmessung aus.

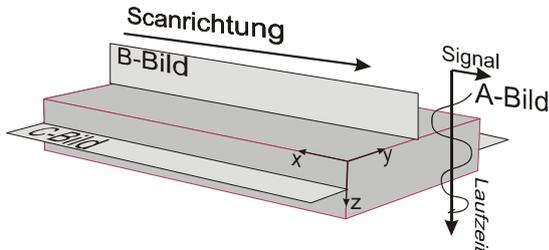


Bild 28: A-Bild, B-Bild und C-Bild Darstellung von Radar Messdaten

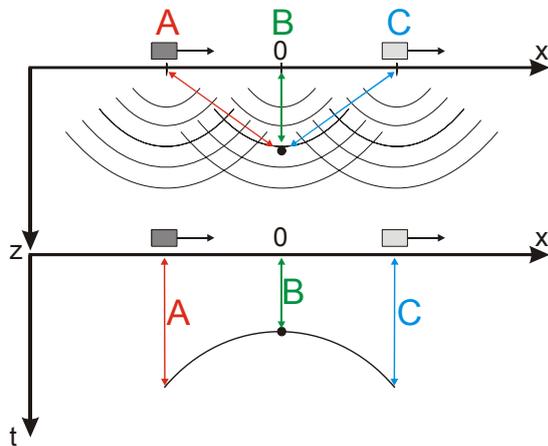


Bild 29: Zustandekommen der charakteristischen Rückstreu-Hyperbeln

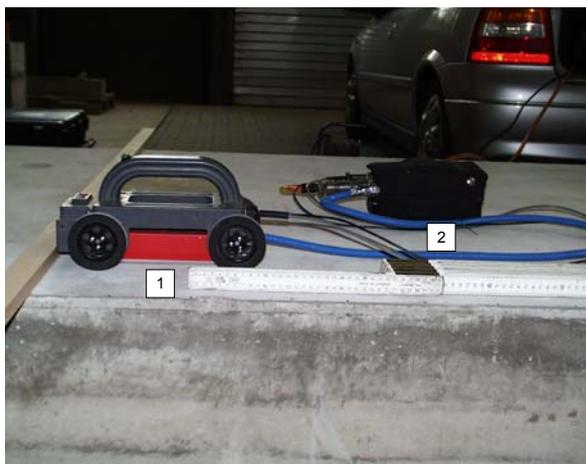


Bild 30: Geo-Radar-System, Antenne (1) und Verstärkersystem (2)

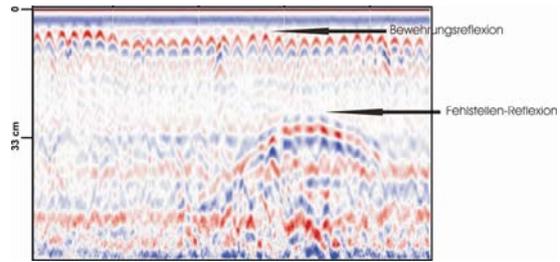


Bild 31: Block 136.2, Radargramm von der Fehlstelle

8.2 Durchführung der Messung und Auswertung

Bei den Radar-Impulsmessungen wurde entlang der Messlinien kontinuierlich, z. B. alle 10 mm, eine Messung durchgeführt. Die Messwerte wurden in einem Erfassungsrechner gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt ausgewertet.

In Bild 31 ist exemplarisch das B-Bild einer Messspur von der Fehlstelle in Block 136.2 dargestellt. Es sind die Reflexionshyperbeln der ersten Bewehrungslage zu erkennen sowie die Reflexion der Rückwand der Fehlstelle. Durch die Reflexionsparabeln der zweiten Bewehrungslage wird die eigentliche Rückwand der Tunnelinnenschale abgeschattet und deshalb nicht erkannt. Es ist also möglich, Fehlstellen, die vor der zweiten Bewehrungslage liegen, zu erkennen und näher zu untersuchen hinsichtlich ihrer Größe, Lage und Ausdehnung. Da kein Rückwandecho beobachtet werden konnte, konnte die Dicke der Tunnelinnenschale nicht erkannt und bestimmt werden.

9 Detailuntersuchung in Block 136.2

Nach der Injektion konnte das Injektionsgut mit den verwendeten ZfP-Messverfahren zerstörungsfrei nicht nachgewiesen werden. In Abstimmung mit der „ATB Arbeitsgemeinschaft Tunnel-Burgholz“ und dem „Landesbetrieb Straßenbau Nordrhein-Westfalen“ wurde daraufhin am 24. November 2004 eine Kernbohrung durchgeführt. Damit die Abdichtung nicht beschädigt wurde, sollte nur bis 35 cm Tiefe gebohrt werden. In Bild 32 ist der gesamte Bohrkern abgebildet. Deutlich ist der Übergang Tunnelinnenschalen-Beton und Injektionsgut zu erkennen. Es ist kein Verbund vorhanden. Die vor und nach der Injektion mit Ultraschall-Echo und Impakt-Echo gemessene Dicke der Tunnelinnenschale stimmte mit der tatsächlichen Dicke exakt überein.

In Bild 33 ist die unterschiedliche Färbung des Injektionsgutes an der Oberkante des Bohrkerns (Tunnelschalenaußenwand zum Fels) deutlich zu erkennen. Direkt am Übergang Tunnelinnenschalen-Beton/Injektionsgut hat keine voll-

ständige Aushärtung des Injektionsgutes stattgefunden. Es ist zu vermuten, dass ein Teil des Wassers sofort in den erhärteten Tunnelinnenschalen-Beton gezogen ist und somit dem Injektionsgut beim Erhärten fehlte. In ein bis zwei Millimeter Tiefe ist eine pulvrige Schicht vorhanden. Ein Verbund (Kraftschluß) bestand somit nicht.



Bild 32: Block 136.2, Messpunkt 732, Bohrkern von der Fehlstelle



Bild 33: Block 136.2, Messpunkt 732, Bohrkern von der Fehlstelle (Detailaufnahme)

Diese Schicht (Materialänderung) wirkte wie ein Luftspalt. Die Körperschallwellen wurden hier vollständig reflektiert. Da die Injektion in mehreren Schichten durchgeführt wurde, ist nach 2 cm eine zweite Luft-Trennschicht im Injektionsgut zu erkennen. Der Bohrkern hat, zusammen mit dem Injektionsgut, eine Länge von 27 cm. Oberhalb des Bohrkerns -bis zur Abdichtung- ist noch Injektionsgut vorhanden. Die Bohrung wurde aber nicht weiter

durchgeführt, da die Gefahr bestand, die Abdichtung zu beschädigen.

10 Vergleich der Messverfahren

Im Tunnel-Burgholz wurden mit einem Tunnel-Laserscanner Abstandsmessungen (LA) zur Prüfkontrolle durchgeführt. Diese Messungen wurden einmal nach Aufbringen des Spritzbetons (Erkennen von Überprofil) und einmal nach dem Betonieren der Tunnelinnenschale (Lichttraumprofilkontrolle) durchgeführt. Alle 2 cm wurde in Tunnellängsrichtung ein Messprofil radial alle 2 cm ein Messwert erfasst. Somit war es möglich, die Messwerte genau den aufgetragenen Messpunkten des Messrasters zuzuordnen und zu vergleichen. Mit folgender Berechnung kann die erwartete Mindestdicke der Tunnelinnenschale bestimmt werden:

Vorgegebene Dicke der Tunnelinnenschale (35 cm) + Über- oder Unterprofil zum Spritzbeton (12 cm) + Abdichtung und Geotextil (0,2 cm + 0,2 cm) – Über- oder Unterprofile angenommene realistische Werte sind.

Mit den von der Firma Geodata, Leoben (Austria) zur Verfügung gestellten Tunnelscanner-Messwerten der Über- und Unterprofile wurden die erwarteten Dicken der Tunnelinnenschale berechnet und den mittels Impakt-Echo und Ultraschall-Echo gemessenen Dicken gegenübergestellt. In Bild 34 ist am Verlauf der grafischen Darstellung deutlich zu erkennen, dass alle drei Messverfahren keine signifikanten Abweichungen von einander aufweisen. Deutlich ist die Welligkeit der Spritzbetonoberfläche bei allen drei Messverfahren zu erkennen. Hieraus ergibt sich nun eine Möglichkeit, die ZfP-Dickenmessungen zu vergleichen und zu überprüfen. Es ist also sinnvoll, die Tunnel-Laserscanner-Abstandsmessungen zum Spritzbeton und zur Tunnelinnenschale grundsätzlich mit durchzuführen, um eine Berechnung der zu erwartenden Dicke der Tunnelinnenschale zu ermöglichen. So wird es möglich sein, im Falle von Unstimmigkeiten zerstörende Kernbohrungen zu vermeiden.

In Bild 35 ist bei der Blocklängenkoordinate 5,00 m eine Abweichung der Messwerte der drei Messteams zu erkennen. In Block 136.2 war -wie beabsichtigt- kein Messgitter aufgetragen. Es wurde also nicht exakt an den gleichen Punkten gemessen. Die Oberkante der Tunnelinnenschale zum Fels ist nicht eben (siehe Bild 11 bis 14). Es sind Überhöhungen und Tiefen vorhanden und deutlich zu erkennen. Da die drei Impakt-Echo-Messteams den gleichen Wert ge-

messen haben, ist davon auszugehen, dass an dieser Stelle eine Überhöhung vorhanden war. Diese Überhöhung kann das Laserscanner-Abstands-Messverfahren nicht erkennen. Der in Bild 20 als Ausreißer markierte Impakt-Echo-Messwert musste hier korrigiert werden. Bei der

Blocklänge 8,00 m bis 10,00 m -hier liegt die Hohlstelle- ist nochmals deutlich zu erkennen, dass aus der Laserscanner-Abstandsmessung nur die erwartete Dicke der Tunnelinnenschale zu ermitteln ist. Hohlstellen können mit dem Laserscanner-Messverfahren nicht erkannt werden.

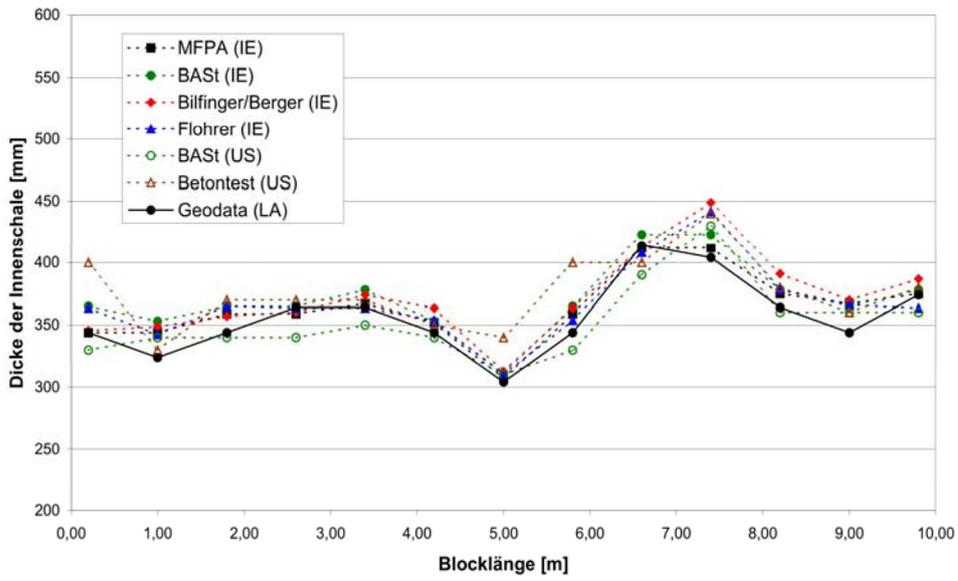


Bild 34: Block 137.2, Profil 0,00 Firste, Vergleich der Laserscanner- (LA), Impakt-Echo- (IE) und Ultraschall-Echo-Messungen (US).

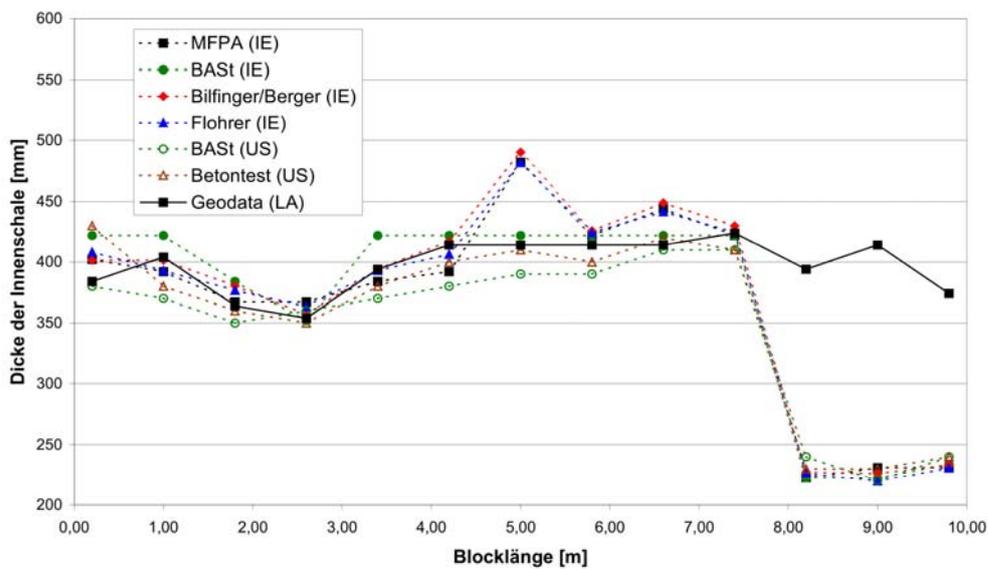


Bild 35: Block 136.2, Profil 0,00 Firste, Vergleich der Laser- (LA), Impakt-Echo- (IE) und Ultraschall-Messungen (US)

11 Zusammenfassung und Ausblick

Mit den abgeschlossenen messtechnischen Untersuchungen sollte nachgewiesen werden, unter welchen Voraussetzungen eine durchgeführte Injektion mit den Verfahren der zerstörungsfeien Prüfung (ZfP) nachgewiesen werden kann. Im ersten Messdurchlauf - vor der Injektion - wurde nachgewiesen, dass die Messwerte der Impakt-Echo-Messverfahren der einzelnen Messteams untereinander sehr gut vergleichbar und reproduzierbar sind. Gleiches gilt auch für die Ultraschall-Echo-Messverfahren. Im Bereich der Hohlstelle des Blockes 136.2 konnte das verpresste Injektionsgut bei der Wiederholungsmessung nicht nachgewiesen werden. An der Hohlstelle wurde deshalb eine Kernbohrung durchgeführt. Am Bohrkern war deutlich zu erkennen, dass am Übergang Beton-Tunnelinnenschale zum Injektionsgut kein fester Verbund vorhanden war (Bild 32 und 33). An diesem Übergang werden die Körperschallwellen reflektiert. Das vorhandene Injektionsgut konnte mit den ZfP-Messverfahren nicht nachgewiesen werden.

Es ist deshalb erforderlich zu klären, ob es betontechnologisch möglich ist, das Injektionsgut so zu verarbeiten und einzubringen, dass ein fester Verbund zwischen dem Tunnelinnenschalen-Beton und dem Injektionsgut gewährleistet werden kann. Hierzu sollten Probekörper erstellt werden mit unterschiedlichen Einbaubedingungen: z.B. mit rauher und glatter Oberfläche, mit unterschiedlichem Injektionsgut, mit und ohne vorherigem Befeuchten der Oberfläche des Probekörpers.

Weiterhin erscheint es sinnvoll, weitere Untersuchungen an neu erstellten Tunnelbauwerken durchzuführen, um die noch offenen Fragen bezüglich eines Verbundes zu klären. Darüber hinaus sind zusätzliche Detailinformationen über Art und Weise des Einbaus des Injektionsgutes erforderlich, um diese dann abschließend beurteilen zu können.

Hierzu ist auch die Schallwellengeschwindigkeit im Injektionsgut zu ermitteln, um dies bei den Messungen und Auswertungen zu berücksichtigen.

Es ist sinnvoll, die Tunnel-Laserscanner-Abstandsmessungen zum Spritzbeton und zur Tunnelinnenschale grundsätzlich mit durchzuführen, um mit Hilfe dieser Messdaten die Berechnung der erwarteten Mindestdicke der Tunnelinnenschale durchführen zu können. Der Vergleich mit den ZfP-Messwerten wird in vielen Konfliktfällen helfen, eine zerstörende Untersuchung, d.h. eine Kernbohrung, zu vermeiden.

Beim Neubau eines Tunnels sollte ein Probekörper hergestellt werden, damit gleiche und reproduzierbare Kalibrierbedingungen vorhanden sind. Am Bauwerk eine Kalibrierstelle vorzusehen ist nur dann sinnvoll, wenn sichergestellt werden kann, dass die Rückseite der Kalibrierstelle eben und glatt ist.

12 Literatur

- [1] Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch Gladbach, Abteilung Brücken- und Ingenieurbau:
RI-ZFP-TU Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen Ausgabe 2001.
- [2] Sansalone, M.J.; Street, W. (1997) Impakt-Echo NDE of Concrete and Masonry, Bulbier Press, Ithaca 1997
- [3] Friebel, W.-D., Krieger J.: „Qualitätssicherung der Tunnelinnenschale und der Tunneldrainage“. Tunnelbau 2003, S. 353.382
- [4] Friebel, W.-D., Krieger J.: „Qualitätssicherung und Zustandserfassung von Straßentunnel mittels zerstörungsfreier Prüfverfahren“. Tunnel, 08. 2001, S.38-46
- [5] Krieger, J.; Krause, M.; Wiggerhauser, H (1998): Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethoden für Betonbrücken, Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B18
- [6] Firma MSIA Spectrum, Low Frequenzy Ultrasonic Flaw Detector A1220, Operating Manual, Moscow, 2000.
- [7] Funk, TH.; Kretz, R.; Lindner, Th.; Wilmers, W. (1996): Zerstörungsfreie Untersuchung des Straßenaufbaus mit dem Impulsradar, Schriftenreihe der Hessischen Straßen- und Verkehrsverwaltung, Heft 40

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

2003

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

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

B 42: **Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau**
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 Brücken-
seilen 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 zur zerstörungsfreien Prüfung von
Brückenbauwerken**
Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann, Wiggenhauser € 15,00

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

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

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

B 52: **Brückenseile mit Galfan-Überszug – Untersuchung der
Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen**
Friedrich, Staeck in Vorbereitung

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

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

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

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

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.