

Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbeton- versuchsträgern mit Ultraschallsensoren

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 172

bast

Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren

von

Ernst Niederleithinger
Andreas Werner
Julio Galindo
Daniel Casares
Anja Bertschat
Vivien Mierschke
Xin Wang
Herbert Wiggerhauser

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)
Berlin

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 172

bast

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

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

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

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

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Kommunikation.

Die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt)** stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
<https://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 89.0312:
Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken –
Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern
mit Ultraschallsensoren

Fachbetreuung
Matthias Müller

Fachreferat
Betonbau

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

Redaktion
Stabsstelle Presse und Kommunikation

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-638-2

Bergisch Gladbach, November 2021

Kurzfassung – Abstract

Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken - Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren

Fünf Spannbetondurchlaufträger, die an der RWTH Aachen bis zum Versagen belastet wurden, waren zuvor durch die BAM mit Netzwerken von eingebetteten Ultraschalltransducern ausgerüstet worden. Mit diesen wurden fortlaufend Transmissionsmessungen durchgeführt, die dann mit einer neuartigen, sehr sensiblen Methodik, der Codawelleninterferometrie im Hinblick auf Veränderungen im Material ausgewertet wurden.

Die messtechnische Verfolgung der Belastungsversuche zeigte das große Potential dieser Methodik. Die im Netzwerk erfassten Änderungen der Ultraschallwellengeschwindigkeit geben die Spannungsverhältnisse im Längsschnitt des Trägers schon bei sehr niedrigen Belastungen qualitativ richtig wieder und zeigen bei hohen Belastungen eine gute Korrelation zum sichtbaren Rissbild und Simulationsergebnissen. Dabei weisen räumliche Anomalien und Änderungen in der Charakteristik der Geschwindigkeitsänderungen oft schon auf Rissbildung hin, wenn diese noch nicht an der Oberfläche sichtbar ist. Dies zeigt das Potential im Hinblick auf eine Frühwarnung. Hierfür und ebenso in Bezug auf eine Quantifizierung der Effekte ist aber noch Entwicklungsarbeit notwendig. Dass letzteres prinzipiell möglich ist, zeigt die gute Korrelation zwischen Geschwindigkeitsänderung an einzelnen Transducerpaaren und Versuchsparametern wie Querkraft oder Durchbiegung der Träger speziell bei kleineren Lasten.

Einer der Vorteile der Methodik ist, dass mit einem relativ weitmaschigen Transducernetzwerk gearbeitet werden kann. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Transducer nicht direkt am Ort der Änderung platziert werden müssen und einen relativ großen Bereich um die Transducer herum erfassen.

Shear force load capacity of post tensioned concrete bridges – identification of stress states in experimental girders by ultrasonic transducers

Five post tensioned concrete bridge girders were loaded until failure at RWTH Aachen University. They had been equipped with networks of embedded ultrasonic transducers. Continuous transmission measurements have been performed and evaluated by coda wave interferometry, an innovative method to detect subtle changes in the material.

The ultrasonic monitoring results of the load experiments has shown the great potential of this methodology. The changes of the ultrasonic velocity captured by the network showed the stress state qualitatively correct even at small loads. At high loads the changes correlated to visible crack patterns and simulation results. Anomalies and changes in the characteristics appeared before cracks had become visible at the

surface. This shows the potential of the technique for early warning systems. However, further research and development (e.g. for quantification of the results) is required before practical application. This seems to be feasible, as correlation between ultrasonic velocity change on one side and shear force or deflection of the girder on the other side is very good especially for smaller loads.

One of the advantages of the methodology is that a sparse network of transducers is sufficient. The transducers need not to be placed directly at the point of interest. The area of influence is quite large.

1	Anlass.....	7
2	Methodik	7
2.1	Ultraschall-Transmissionsmessungen	7
2.2	Eingebettete Ultraschalltransducer	8
2.3	Codawelleninterferometrie (CWI).....	9
3	Installation der Sensorik.....	13
4	Messausrüstung und Messparameter	17
5	Auswertung	19
5.1	Datenbearbeitung	19
5.2	Laufzeit, Geschwindigkeit (t, v)	21
5.3	Energie (E)	21
5.4	Kreuzkorrelation (CC).....	21
5.5	Geschwindigkeitsänderung und Kreuzkorrelation mittels Codawelleninterferometrie (CWI-dv, CWI-CC).....	21
5.6	Versuchsparameter RWTH und Synchronisation.....	22
6	Ergebnisse.....	22
6.1	Voruntersuchungen	22
6.1.1	Vergleich der Ultraschall-Auswertungsparameter	22
6.1.2	Messungen während der Vorspannung.....	29
6.1.3	Messungen in der Ruhephase	29
6.2	Träger DLT 1.1.....	31
6.3	Träger DLT 1.2.....	33
6.4	Träger DLT 1.3.....	34
6.4.1	Einzelmessungen	34
6.4.2	Flächenhafte Auswertung.....	36
6.5	Träger DLT 1.4.....	44
6.5.1	Auswertung Einzeltransducerpaar	44
6.5.2	Flächenhafte Darstellung.....	44
6.6	Träger DLT 1.5.....	47
6.6.1	Auswertung Einzeltransducerpaar	47
6.6.2	Flächenhafte Darstellung.....	47

7	Zusammenfassung und Ausblick	51
8	Danksagung	52
9	Literatur	52
Bilder	53
Tabellen	55

1 Anlass

Die Bundesanstalt für Straßenwesen hat die RWTH Aachen (IMB, Prof. Hegger) mit Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit von Spannbeton-Durchlaufträgern beauftragt. Gleichzeitig hat sie die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung beauftragt, die Versuche mit eingebetteten Ultraschalltransducern auszurüsten und zu prüfen, inwieweit sich innere Spannungszustände damit unter Einsatz neuartiger Datenauswertungsmethoden ("Codawelleninterferometrie") erfassen lassen.

Die Versuche wurden an fünf jeweils 12m langen Spannbeton-Durchlaufträgern (DLT 1.1 bis DLT 1.5) durchgeführt, die sich in konstruktiven und experimentellen Details unterschieden. Die durch die RWTH ermittelten Versuchsdaten sowie Konstruktionszeichnungen wurden der BAM zur Verfügung gestellt.

Die ersten beiden Versuche (DLT 1.1 und DLT 1.2) dienten vor allem der Ermittlung optimaler Versuchsparameter und Experimenten zu einer möglichst sensitiven Anordnung der Transducer im Objekt. Es zeigte sich, dass mit der gewählten Auswertemethodik die Vorspannung und die sehr frühe Phase der Belastung gut erfasst werden konnten. Aber schon bei mittleren Belastungen weit vor dem Versagen lieferte die Methodik keine verwertbaren Daten mehr. Zudem ließ sich die räumliche Verteilung der Spannung nicht nachvollziehen.

Daher wurde für die weiteren Versuche sowohl die Anzahl der Transducer erhöht und die Anordnung modifiziert sowie eine Erweiterung der Auswertetechnik entwickelt, die eine Verfolgung der Versuche bis kurz vor dem Versagen ermöglicht. Diese Modifikationen wurden anhand der Experimente am Durchlaufträger DLT 1.3 erfolgreich erprobt. Eine zumindest qualitative Darstellung der Spannungsverhältnisse in der Ebene ist nunmehr möglich.

Diese Methodik wurde dann (allerdings mit wieder reduzierter Transducerzahl) auf die Messergebnisse der Träger DLT 1.4 und DLT 1.5 angewandt. Die Daten der ersten beiden Träger wurden mit der modifizierten Auswertemethodik erneut bearbeitet.

2 Methodik

2.1 Ultraschall-Transmissionsmessungen

Ultraschall-Transmissionsmessungen werden seit Jahrzehnten erfolgreich zur Prüfung und Qualitätssicherung von Baustoffen und Bauteilen im Bauwesen eingesetzt. Sie sind z. B. in DIN 12504-4 geregelt [1]. Wesentlicher Indikator ist die Wellengeschwindigkeit von Kompressionswellen (Longitudinalwellen), vereinzelt werden auch die Geschwindigkeit von Scherwellen oder die Amplituden bzw. deren Dämpfung herangezogen. Ziel ist meist die Bestimmung von Änderungen in der Druckfestigkeit oder die Verfolgung von Schädigungen. Direkte analytische Zusammenhänge zwischen den gemessenen physikalischen Parametern und den gesuchten bautechnischen Werten gibt es nicht. In Versuchen lassen sich jedoch statistisch quantitative, material- und objektspezifische Zusammenhänge finden.

Zu folgenden relevanten Material- und Zustandsgrößen bzw. zu den Änderungen bestehen Zusammenhänge, oft mit Querabhängigkeiten [4]:

- Zementtyp, Wasser-Zementwert, Zuschlag, Verdichtung

- Bewehrung
- Porosität, Wassersättigung
- Druckfestigkeit
- Rissverteilung, Rissgröße
- Temperatur
- (mechanische) Spannung

Die bisher eingesetzte Mess- und Auswertetechnik hat jedoch Grenzen. Die in der Regel extern aufgesetzten Ultraschalltransducer unterliegen während längerer Versuche oft Schwankungen in der Ankopplung und sind empfindlich gegenüber externen Einflüssen bis hin zu Vandalismus. Die verwendeten Indikatoren und Auswertelgorithmen sind gegenüber geringen, langsamen Änderungen wenig sensitiv.

Die in diesem Bericht dargestellte Technologie beruht auf zwei Innovationen:

- 1) Einsatz von in den Beton eingebetteten Ultraschalltransducern für dauerhafte Messungen
- 2) Anwendung einer innovativen Auswertemethodik für solche Messungen, der Codawelleninterferometrie

2.2 Eingebettete Ultraschalltransducer

Die Verwendung von in das Objekt eingebetteten Ultraschalltransducern hat vor allem in Bezug auf reale Objekte folgende prinzipielle Vorteile:

- Konstante Ankopplung (z. B. keine Abkopplung durch kleine Oberflächenrisse)
- Verringerung externer Einflüsse (z. B. Sonneneinstrahlung)
- Sicherheit vor Vandalismus
- Bei massiven Objekten Positionierung nahe dem interessierenden Bereich möglich

Den möglichen Nachteilen (z. B. keine Reparaturmöglichkeit) muss durch Redundanzen im Messsystem begegnet werden. Ultraschalltransducer können in Bauwerken über Jahrzehnte funktionstüchtig bleiben [2].

An eingebetteten Ultraschalltransducern wird schon seit längerem geforscht [3]. Keine uns bekannte Entwicklung hat jedoch das Laborstadium verlassen. Vor einiger Zeit hat die Firma ACS im Auftrag und nach Vorgaben der BAM neuartige Transducer entwickelt, die robust und langlebig sind, als Sender oder Empfänger einsetzbar sind, sowie aufgrund ihrer Empfindlichkeit auch auf mehrere Meter Entfernung arbeiten können (Abbildung 1). Diese Transducer (Acsys S0807) wurden in den letzten Jahren in Forschungsprojekten charakterisiert und getestet [4][5]. Ihr Frequenzspektrum (Abbildung 2) und ihre Abstrahlcharakteristik sind auf den Einsatz in größeren Netzwerken hin optimiert. Die frühesten Exemplare arbeiten seit Jahren ohne Ausfälle in Testobjekten.



Abbildung 1: Der Ultraschall-Transducer ACS S0807.

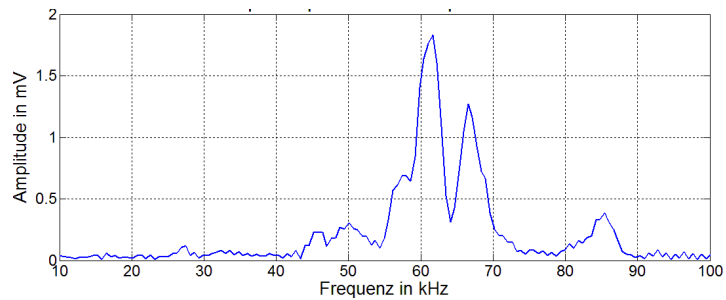


Abbildung 2: Frequenzspektrum des ACS S0807 [4].

2.3 Codawelleninterferometrie (CWI)

Die meisten Ultraschall-Transmissionsmessungen beruhen auf Laufzeitmessungen bis zum ersten Eintreffen des Signals („Ersteinsatz“) vom Sender zum Empfänger. Ändert sich etwas in der Struktur oder in den elastischen Eigenschaften des Materials, ändern sich der Wellenweg und/oder die Geschwindigkeit, was sich in einer veränderten Laufzeit bemerkbar macht. Diese Änderung ist aber oft so gering, dass sie nur schwer quantitativ zu messen ist. In späteren Teilen des registrierten Signals, der sogenannten Coda, haben die Wellen aber sehr viel längere Wege zurückgelegt und den interessierenden Bereich durch Reflektion und Streuung mehrfach durchlaufen. Hierdurch sind die Laufzeitunterschiede größer und machen sich in Signalverschiebungen bemerkbar. Der Einflussbereich ist größer und die einzelnen Wellenwege sind nicht zu trennen. Man spricht daher auch von diffusen Wellen (Abbildung 3).

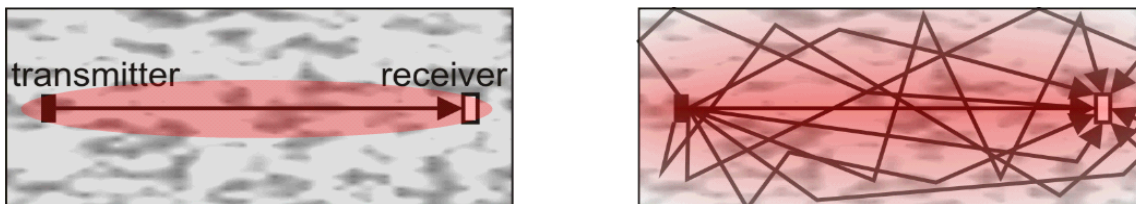


Abbildung 3: Prinzipskizze: Wellenwege (Pfeile) und Einflussbereiche (rötlich schattiert) von direkten und diffusen Signalen.

Abbildung 4 zeigt den Einfluss einer kleinen Last auf ein Ultraschall-Transmissionssignal. Die blaue Kurve wurde vor Beginn der Belastung mit einer zentral angeordneten Sender-Empfänger-Kombination an DLT 1.3 aufgenommen. Die rote Kurve entspricht dem Messsignal 24 Minuten nach Beginn des Belastungsversuchs ohne, dass im Bereich der beiden Transducer schon sichtbare Risse aufgetreten wären. Während sich die Laufzeit der direkten Welle (Einsatzzeit zu Beginn des Signals) nicht messbar verschiebt, zeigt sich im späten Teil, der Coda, eine signifikante Verschiebung.

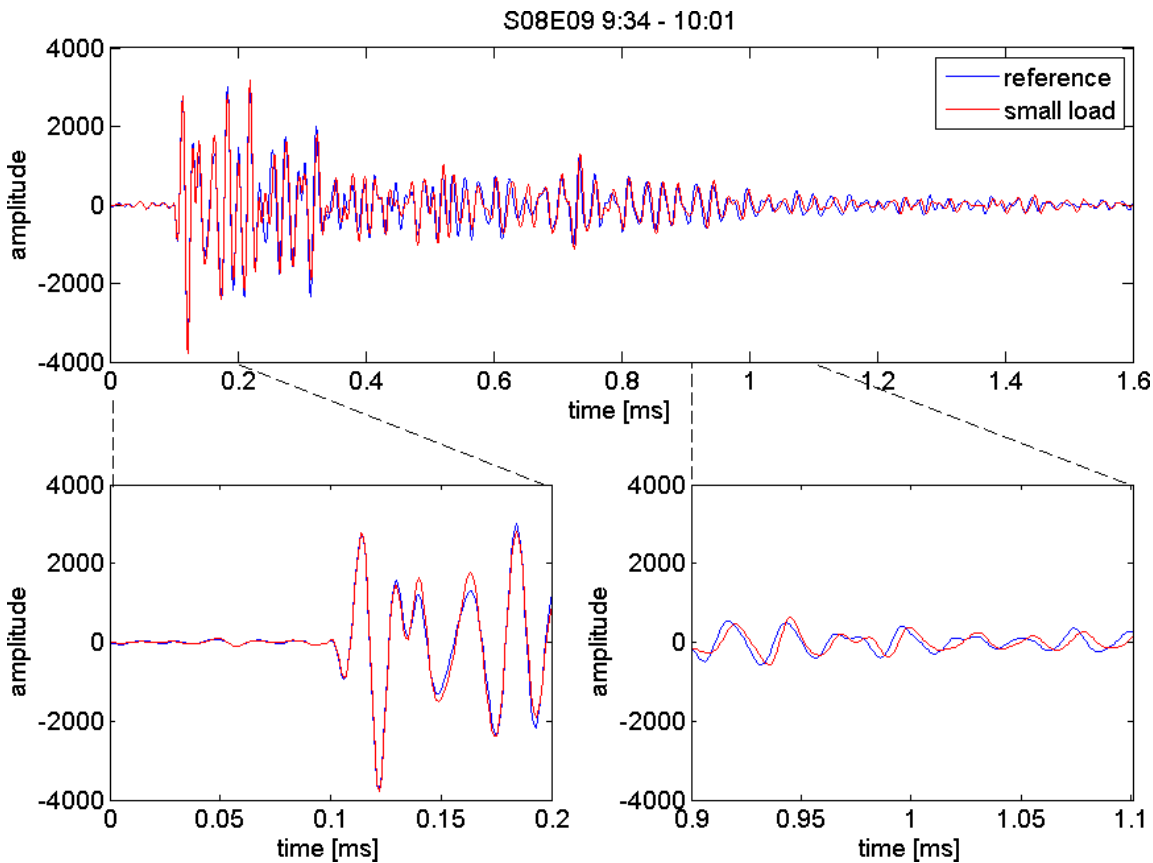


Abbildung 4: Einfluss einer kleinen Last auf ein Ultraschall-Transmissionssignal.

Diese Unterschiede können mit Hilfe der Codawelleninterferometrie (engl. coda wave interferometry, CWI) erfasst werden. Die Methode erfordert eine Referenzmessung vor der Änderung im Objekt und erfasst nur relative Unterschiede zu diesem Referenzzustand. Die Methode wurde ursprünglich in der Seismologie entwickelt, um Änderungen der tektonischen Spannungen in der Erdkruste zu erfassen oder Änderungen in Gesteinseigenschaften zu detektieren [6][7][8]. Seit kurzem werden zumindest im Labormaßstab auch Messungen an Beton durchgeführt [9].

Die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Für diesen Bericht wurde die sogenannte Stretching-Methode eingesetzt [10]. Hierbei wird das Signal mit einem sehr kleinen Faktor v gedehnt bzw. gestaucht und anschließend mit dem Referenzsignal verglichen. Die Ähnlichkeit der Signale wird über die Kreuzkorrelation ohne Zeitverschiebung bestimmt:

$$CC(v) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Dabei sind x_i, y_i die Einzelwerte der Zeitreihen (Referenzsignal bzw. gestrecktes Messsignal) und \bar{x}, \bar{y} die zugehörigen Mittelwerte. Der Korrelationskoeffizient CC nimmt bei perfekter Übereinstimmung den Wert 1 an, bei völlig unkorrelierten Signalen ist er 0, bei bzgl. der Amplitude spiegelverkehrten Signalen -1.

Der Korrelationskoeffizient wird schrittweise innerhalb eines bestimmten Wertebereichs für den Faktor v berechnet (Abbildung 5), um den optimalen Wert (größtmöglicher

Korrelationskoeffizient) für v zu finden. Dieser Faktor entspricht der Geschwindigkeitsänderung im Material (CWI-dv). Der dabei erzielte Korrelationskoeffizient (CWI-CC) ist ein Maß dafür, wie gut sich die Signalveränderung durch eine reine Geschwindigkeitsveränderung erklären lässt. Diese Auswertung kann wie in Abbildung 5 mit verschiedenen Teilen des Signals (Zeitfenster, „windows“) erfolgen. Im dargestellten Fall ergaben sich aber keine wesentlichen Unterschiede im Ergebnis. Für die weitere Betrachtung wurde das Zeitfenster 3 verwendet, sodass der Verlauf des Korrelationskoeffizienten ein schärferes Maximum aufweist.

Die Wahl der Referenzmessung ist willkürlich. Es wurden in den später beschriebenen Experimenten mehrere Signale vor dem Beginn der Belastung getestet, um auszuschließen, durch Zufall eine gestörte Messung als Referenz zu wählen.

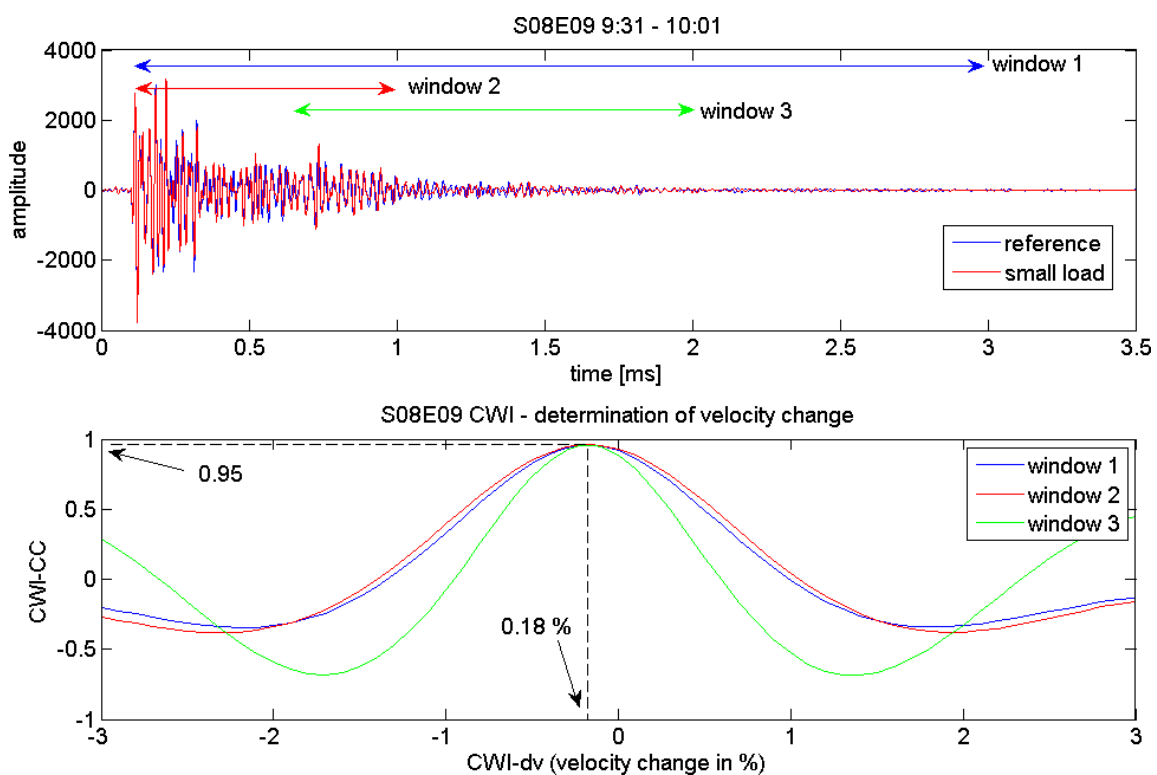


Abbildung 5: Bestimmung der Geschwindigkeit mit Codawelleninterferometrie. Das zu vergleichende Signal wird gedehnt bzw. gestreckt, bis eine optimale Korrelation (Ähnlichkeit) erreicht ist. Dabei können unterschiedliche Teile des Signals („windows“) genutzt werden.

Sind die Änderungen im Material so groß, dass die Phasenverschiebung der Signale im Mittel mehr als eine halbe Wellenlänge beträgt, oder kommen durch Risse zusätzliche Signalanteile hinzu, versagt das Verfahren und liefert falsche Werte. Abhilfe kann ein schrittweises Vorgehen schaffen [11]. Dabei wird nicht die Änderung zu einer Referenz, sondern zu der jeweils vorhergehenden Messung bestimmt (step-CWI). Die Multiplikation aller relativen Änderungen seit der eigentlichen Referenzmessung ergibt dann die kumulative Änderung (step-CWI cum.). Diese ist bis auf Rundungsfehler mit den Werten bei fester Referenz identisch – solange diese verwertbare Daten liefert. Abbildung 6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Geschwindigkeitsänderung für die Messungen mit einer Sender-Empfänger-Kombination in DLT 1.3. Vor der Belastung und bei leichter Belastung

bis etwa eine knappe Stunde nach Versuchsbeginn sind die Werte für feste Referenz und schrittweise Auswertung fast identisch. Danach sind die Änderungen im Material anscheinend so stark, dass nur noch das schrittweise Verfahren verwertbare Ergebnisse liefert. Bis etwa 6800 s nach Versuchsstart fallen die Werte ab, danach stabilisieren sie sich auf niedrigem Level.

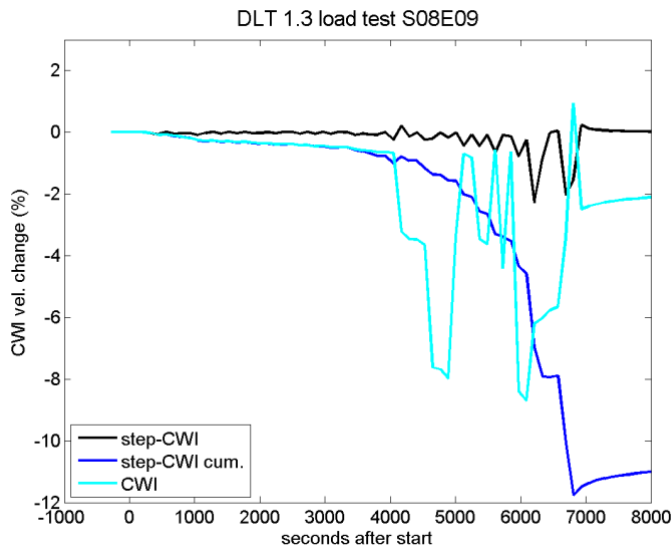


Abbildung 6: Zeitverlauf der mit CWI ermittelten Geschwindigkeitsänderung während des Versuchs.

Der zeitliche Verlauf der bei der Auswertung anfallenden Korrelationskoeffizienten ist in Abbildung 7 dargestellt. Für die Auswertung mit fester Referenz zeigt sich ab etwa einer Stunde nach Messbeginn ein starker Abfall – ein Zeichen, dass die Materialstruktur im Einflussbereich sich gegenüber dem Ausgangszustand so stark verändert hat, dass keine verwertbaren Ergebnisse mehr zu erwarten sind. Die schrittweise Auswertung zeigt an dieser Position und auch später starke negative Zacken – ein Zeichen für starke Materialänderung gegenüber der vorherigen Messung (Rissbildung im Einflussbereich). Die stärkste Änderung gibt es im hier dargestellten Zeitfenster beim Versagen der linken (nicht instrumentierten) Trägerhälfte.

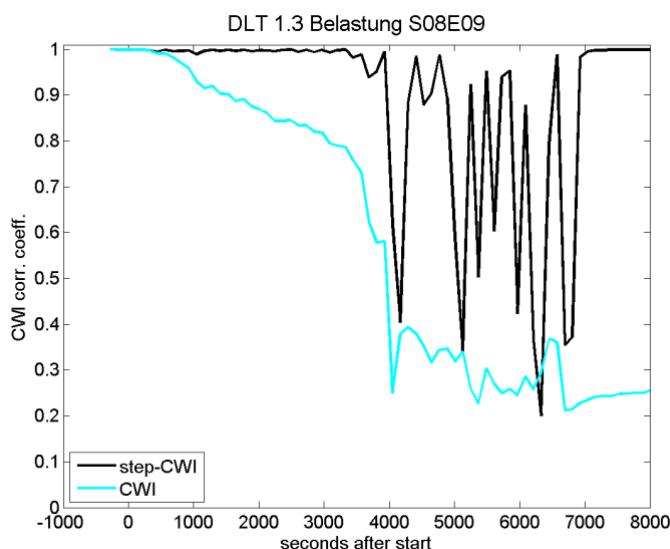


Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der CWI-Korrelationskoeffizienten zur Auswertung aus Abbildung 6.

In erster Näherung ist die Geschwindigkeitsänderung ein Maß für die Änderung der Elastizitätsparameter. Da die Messsignale insgesamt deutlich mehr Schwerwellen als Kompressionswellen enthalten, sind vor allem Änderungen im Schermodul relevant.

Die berechneten Faktoren können als gewichtetes Mittel über einen bestimmten Volumenbereich um Sender und Empfänger verstanden werden. Für eine Bestimmung der lokalen Veränderungen im Volumen eines Objektes sind Messungen mit vielen verschiedenen Sender-Empfänger-Kombinationen im Netzwerk notwendig. Ansätze zur Rekonstruktion der lokalen Änderungen aus solchen Netzwerkmessungen wurden in den letzten Jahren publiziert [12][13] und getestet [14][15]. Allerdings sind diese Rekonstruktionen rechnerisch sehr aufwendig und bisher nur für sehr einfache Objektgeometrien (Quader) möglich. Daher beschränkt sich die Darstellung in diesem Bericht auf die Interpolation der für Einzelpaare ermittelten Werte auf das Objekt.

3 Installation der Sensorik

Die Ultraschalltransducer des Typs Acsys S0807 wurden jeweils vor der Betonage der Träger im Fertigteilwerk der Nessler Grünzig Bau GmbH in Aachen in die Bewehrungskörbe montiert. Dies geschah mit Hilfe von eigens konstruierten und im 3D-Druck gefertigten Clips (Abbildung 8 links). Diese Clips können für verschiedene Bewehrungsdurchmesser und verschiedene Abstände Bewehrungsstab-Transducer hergestellt werden. Zusätzlich wurden die Clips mit Rödeldraht gesichert. Die Transducer wurden meist horizontal quer zur Trägerachse orientiert. Dies gewährleistete gleichermaßen eine radiale Abstrahlung zu den vertikal und horizontal benachbarten Transducern. Wo eine horizontale Montage nicht möglich war (Abbildung 8 rechts, untere linke Bildecke), wurden die Transducer vertikal montiert. Hierdurch ändert sich zwar im Nahfeld die Abstrahlcharakteristik, durch die Streuung an Bewehrung und Zuschlag ist dies ab einer Entfernung von einigen Dezimetern aber ohne großen Belang [5]. Die Kabel wurden mit Hilfe von Kabelbindern gesichert und entlang der Bewehrung nach oben aus der Schalung geführt.

Die Transducer wurden jeweils in der stärker bewehrten Hälfte des Trägers platziert, um eine Beeinflussung des Versuchs so weit wie möglich auszuschließen. In Abbildung 8 rechts ist der Übergang von stärkerer zu schwächerer Bügelbewehrung zu erkennen.

In Träger DLT 1.1 und DLT 1.2 wurden jeweils 8 Transducer montiert. Dies geschah so, dass sich z. B. entlang der Spannglieder eine Messlinie ergab. Nach Vorliegen der ersten Ergebnisse wurde die Strategie gewechselt und ein annähernd regelmäßiges Raster gewählt. In Träger DLT 1.3 wurden dafür insgesamt 20 Transducer eingesetzt, in DLT 1.4 und DLT 1.5 je 10 (Tabelle 1).

Die geplanten Transducerpositionen sind für die Träger DLT 1.1 und DLT 1.2 in Abbildung 9 bis Abbildung 12, für DLT 1.3 in Abbildung 12 bis Abbildung 14 und für DLT 1.4 und DLT 1.5 in Abbildung 15 bis Abbildung 17 dargestellt. Aufgrund der Bewehrungs- und Spannkanauführung in den Körben konnten die Transducer nicht immer genau am geplanten Ort montiert werden. Die genaue Lage wurde nach Montage eingemessen. Größere Verschiebungen bei Betonage und Verdichten sind bei der gewählten Montageart nicht zu erwarten.

Tabelle 1: Daten zur Sensormontage

Träger	Datum	Anzahl Transducer	Anordnung	Abstände ca.
DLT 1.1	18.02.2016	8	Unregelmäßig	0,3 - 1,75 m
DLT 1.2	30.03.2016	8	Unregelmäßig	0,3 - 1,75 m
DLT 1.3	17.10.2016	20	Raster	0,3 - 1 m
DLT 1.4	23.11.2016	10	Raster	0,5 - 1 m
DLT 1.5	23.11.2016	10	Raster	0,5 - 1 m

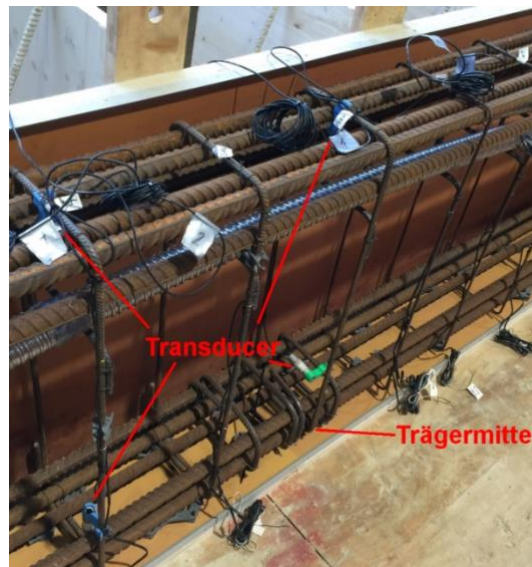


Abbildung 8: Links: Montage der Transducer mittels maßgefertigter Clips im Bewehrungskorb (hier: DLT 1.1, Transducer 2). Rechts: Träger DLT 1.4, Transducer 1, 2, 5, und 6.

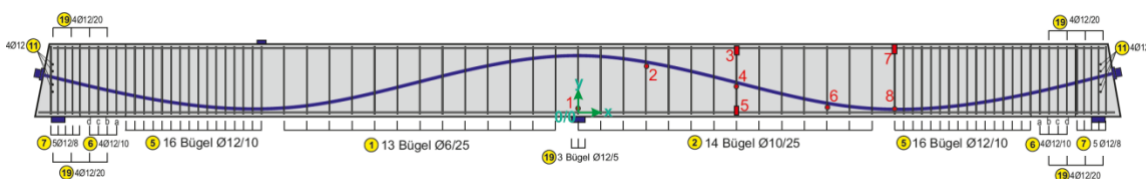


Abbildung 9: Lage der Transducer in Träger DLT 1.1 (in Träger DLT1.2 identisch), Längsschnitt. Trägerlänge 12 m. Rot: Ultraschalltransducer.

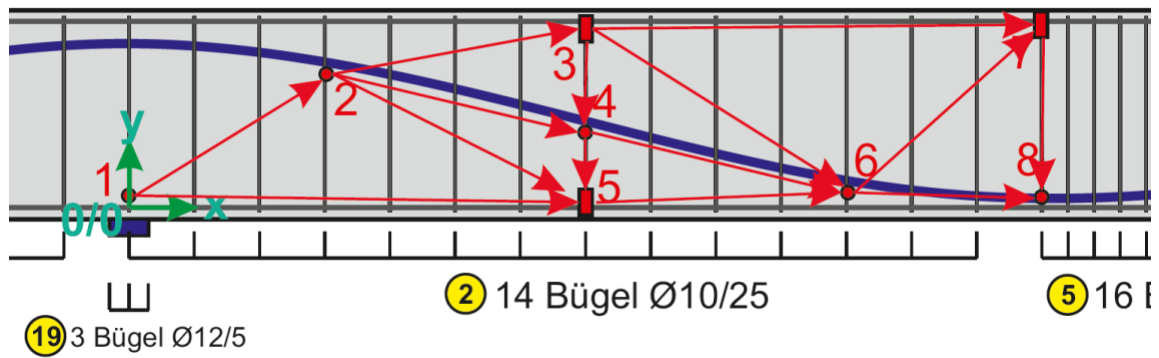


Abbildung 10: Wie Abbildung 9, vergrößert. Trägerhöhe 0,8 m, Abstand zwischen vertikalen Bügeln 0,25 m. Rote Pfeile: Verwendete Transducerpaare (s. Kapitel 4).

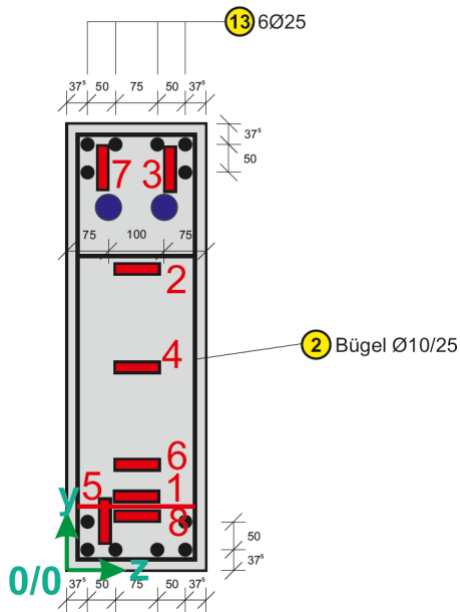


Abbildung 11: Lage der Transducer (Projektion) im Querschnitt von DLT 1.1 (in DLT 1.2 identisch).

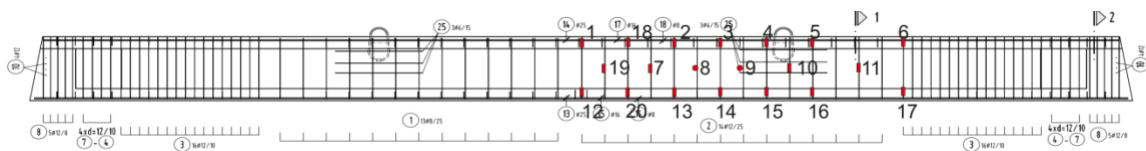


Abbildung 12: Lage der Transducer in DLT 1.3, Längsschnitt. Trägerlänge 12 m. Rot: Ultraschalltransducer.

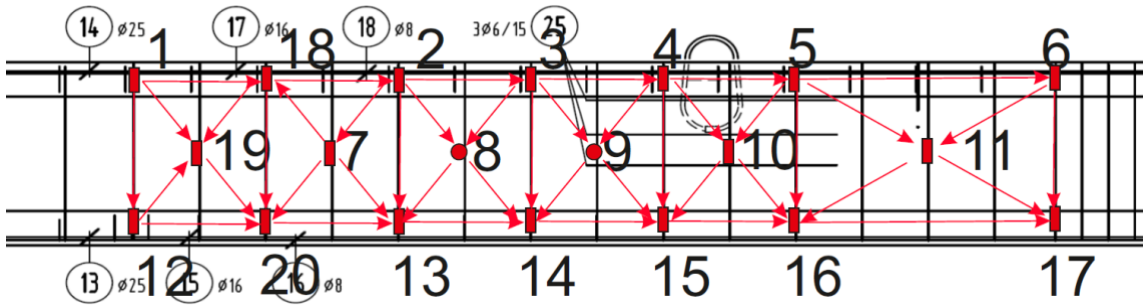


Abbildung 13: Wie Abbildung 12, vergrößert. Trägerhöhe 0,8 m, Abstand zwischen vertikalen Buegeln 0,25 m. Rote Pfeile: Verwendete Transducerpaare (s. Kapitel 4).

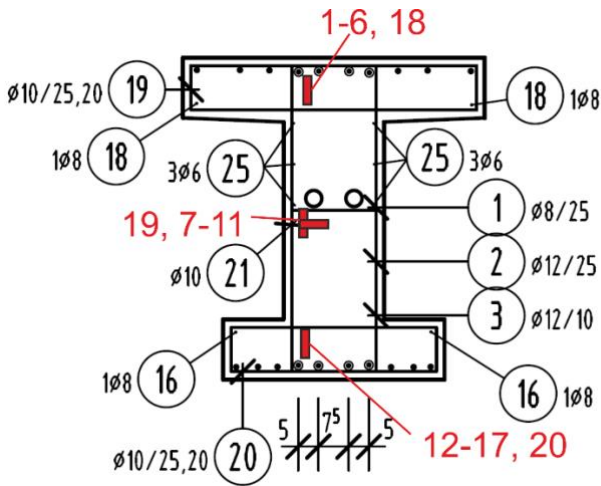


Abbildung 14: Lage der Transducer (Projektion) im Querschnitt von DLT 1.3. Die Montage erfolgte abweichend von den anderen Trägern in der Regel senkrecht. Ausnahmen sind Transducer 8 und 9, die aufgrund der Lage der Spankanäle horizontal montiert wurden.

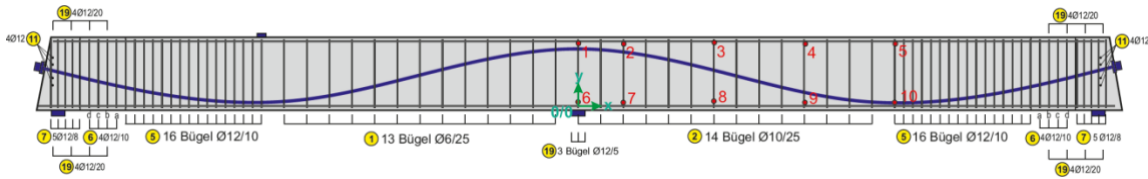


Abbildung 15: Lage der Transducer in Träger DLT 1.4 (in Träger DLT 1.5 identisch), Längsschnitt. Trägerlänge 12 m. Rot: Ultraschalltransducer.

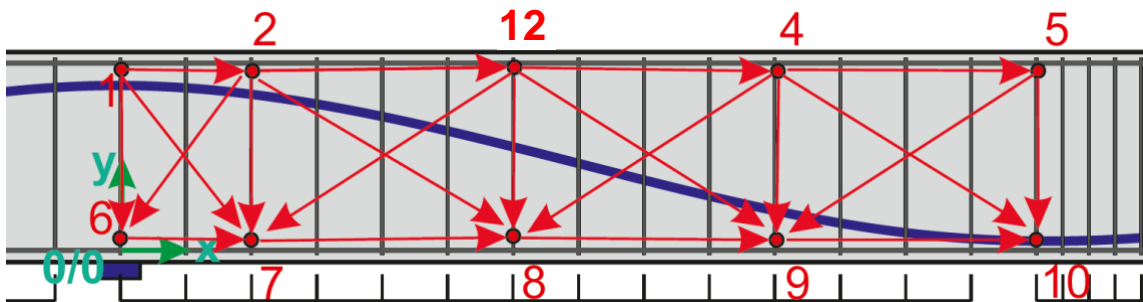


Abbildung 16: Wie Abbildung 15, vergrößert. Trägerhöhe 0,8 m, Abstand zwischen vertikalen Buegeln 0,25 m. Rote Pfeile: Verwendete Transducerpaare (s. Kapitel 4).

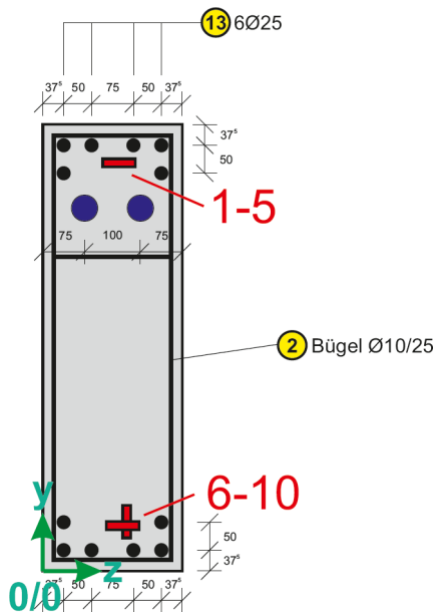


Abbildung 17: Lage der Transducer (Projektion) im Querschnitt von DLT 1.4 (in DLT 1.5 identisch).

4 Messausrüstung und Messparameter

Die Messausrüstung war bis auf ein Element für alle Versuche identisch. Es wurde auf Komponenten, die sich bei früheren Versuchen in der BAM bewährt haben, zurückgegriffen. Kernstück ist eine Messwerterfassung vom Typ National Instruments NI 6366 (Nr. 2 in Abbildung 18 und Abbildung 19), die von einem Messrechner (1) mittels eines für die Versuche an der RWTH angepassten LabVIEW-Steuerprogramms (Eigenentwicklung BAM) gesteuert wird. Die Messwerterfassung liefert für jede Einzelmessung ein Startsignal, das vom Signalgenerator (3) in einen Ultraschall-Sendeimpuls umgesetzt wird. Dieses Signal wird über den Multiplexer (Mehrfach-Messstellenumschalter, 4) an einen vom Steuerprogramm als Sender ausgewählten Transducer im Beton (5) weitergegeben. Der Multiplexer verbindet zudem einen weiteren Transducer als Empfänger mit der Messwerterfassung. Das Steuerprogramm verfügt über eine Liste der gewünschten Sender-Empfängerkombinationen und arbeitet diese nacheinander ab. Die Messung eines kompletten Datensatzes dauert je nach gewählten Parametern wenige Sekunden bis einige Minuten und wird in festgelegten Zeitintervallen wiederholt.

Um die Datenqualität noch zu verbessern, wurde ab Träger DLT 1.3 noch ein Empfangsverstärker und Filter (Stanford Research SR560) in den Aufbau integriert. Er dient auch dazu, den oft sehr hohen Gleichspannungsanteil zu entfernen. Hierdurch kann die Dynamik bei der Digitalisierung erhöht werden.

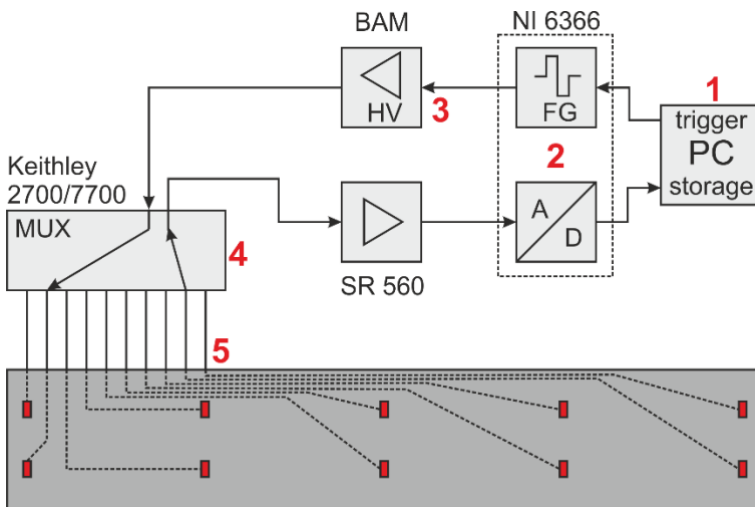


Abbildung 18: Skizze des Aufbaus der Ultraschall-Messtechnik. Der Empfänger-Verstärker SR560 wurde erst ab Träger DLT 1.3 eingesetzt. Die Nummern entsprechen den Geräten in Abbildung 19.

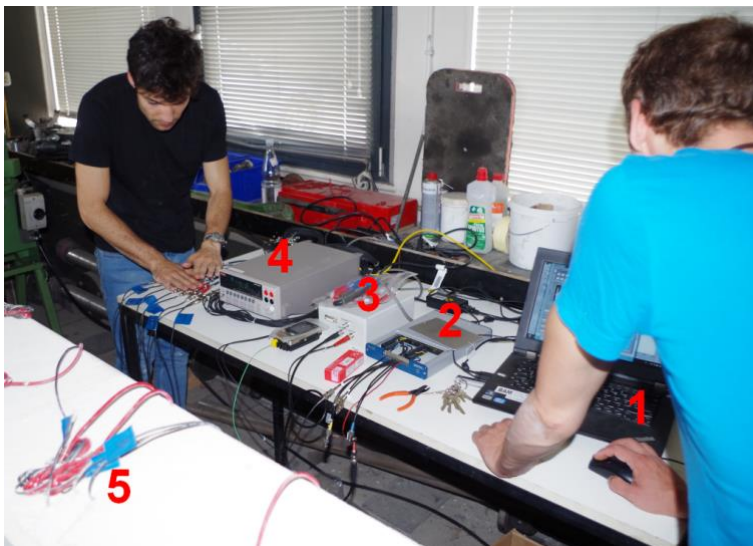


Abbildung 19: Aufbau der Ultraschall-Messtechnik in der Versuchshalle der RWTH. 1: Messrechner, 2: Datenerfassung, 3: Signalgenerator, 4: Multiplexer, 5: Kabelführung zu den Transducern im Beton.

Um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten, wurden die Messparameter für alle Versuche nach Möglichkeit identisch gewählt. Tabelle 2 enthält die wichtigsten Werte. Soweit bei einzelnen Versuchen davon abgewichen wurde, ist dies im entsprechenden Abschnitt vermerkt.

Nicht alle möglichen Transducerkombinationen wurden in den Versuchen genutzt. Da z. B. in DLT 1.3 insgesamt 20 Transducer eingebaut wurden, ergaben sich hier 190 mögliche verschiedene Sender-Empfänger-Kombinationen (380, wenn auch die inversen Anordnungen gemessen worden wären). Da die Messungen mit der derzeitigen Technik sequentiell erfolgen, ergäbe sich eine Wiederholungsrate von bestenfalls ca. 10 Minuten, was für die Versuche deutlich zu langsam wäre. Daher wurden meist nur Kombinationen benachbarter Transducer genutzt. Die genutzten Strahlwege sind in Abbildung 10 (DLT 1.1 und 1.2), Abbildung 13 (DLT 1.3) und Abbildung 16 (DLT 1.4 und 1.5) dargestellt.

Tabelle 2: Messparameter für die Versuche an DLT 1.3

Parameter	Wert
Anzahl der Transducer	20
Anzahl der Sender-Empfängerkombinationen	48
Abstand Sender-Empfänger	0,3 - 0,94 m
Mittenfrequenz Sendersignal	60 kHz
Signalform	Doppelrechteck
Samplefrequenz	1 MHz
Aufzeichnungszeit	5 ms
Mittelungen	1-12
Messintervall	2 min

5 Auswertung

Aus den Ultraschallsignalen wurden für bestimmte Sender-Empfänger-Kombinationen Kennwerte extrahiert, die dann mit den anderen, von der RWTH erfassten Versuchsparametern verglichen werden. Vorher wurden die Ultraschallsignale einer Datenbearbeitung unterzogen (Abschnitt 5.1).

Bei den Parametern können zwei Gruppen unterschieden werden: Konventionelle Ultraschall-Parameter (5.2 bis 5.4) und die in Abschnitt 2 beschriebenen Kennwerte aus der Codawelleninterferometrie.

5.1 Datenbearbeitung

Vor Auswertung der Daten wurden folgende Schritte durchgeführt (siehe Abbildung 20):

- Abschneiden der „pretrigger“-samples (Zusätzliche Aufzeichnungszeit vor dem eigentlichen Signal)
- Beseitigung des Offsets (Gleichspannungsanteil durch Sensordrift)
- Dämpfung des elektrischen Übersprechens der Senderelektronik zu den Empfängerkabeln („crosstalk“)
- Bandpassfilterung, untere Grenzfrequenzen 1-5 kHz, obere Grenzfrequenz 150-300 kHz, zur Beseitigung hochfrequenter Rauschteile im Signal (in Abbildung 20 nur zu späten Zeiten schwach zu erkennen, „noise“).

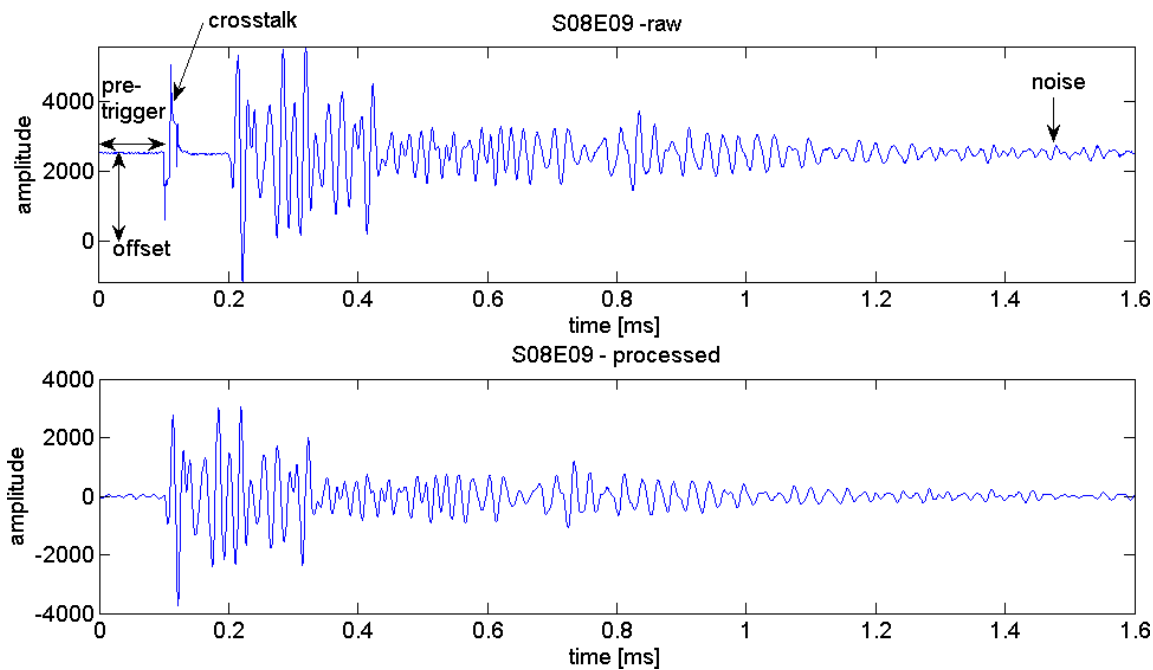


Abbildung 20: Beispiel für eine Einzelmessung vor und nach der Datenbearbeitung.

Nach der Datenbearbeitung sind Änderungen in den Signalen mit fortlaufend steigender Belastung zu erkennen. Abbildung 21 zeigt für eine Sender-Empfänger-Kombination das Signal vor der Belastung (später als Referenz genutzt) und bei geringer bzw. mittlerer Belastung. Dabei zeigt sich bei geringer Belastung die Signalform weitgehend unverändert, der Ersteinsatz erscheint an der gleichen Stelle. Im hinteren Teil des Signales erkennt man eine leichte Verschiebung der Amplituden zu späteren Zeiten hin. Die Belastung hat hier zu einer (sehr kleinen) Verringerung der Geschwindigkeit im Material geführt.

Auch bei mittlerer Last ist der Ersteinsatz kaum verändert. Allerdings zeigen Teile des Signals eine Form- und Amplitudenänderung, ein Hinweis darauf, dass sich im Umfeld der beine Transducer etwas in der Materialstruktur geändert hat.

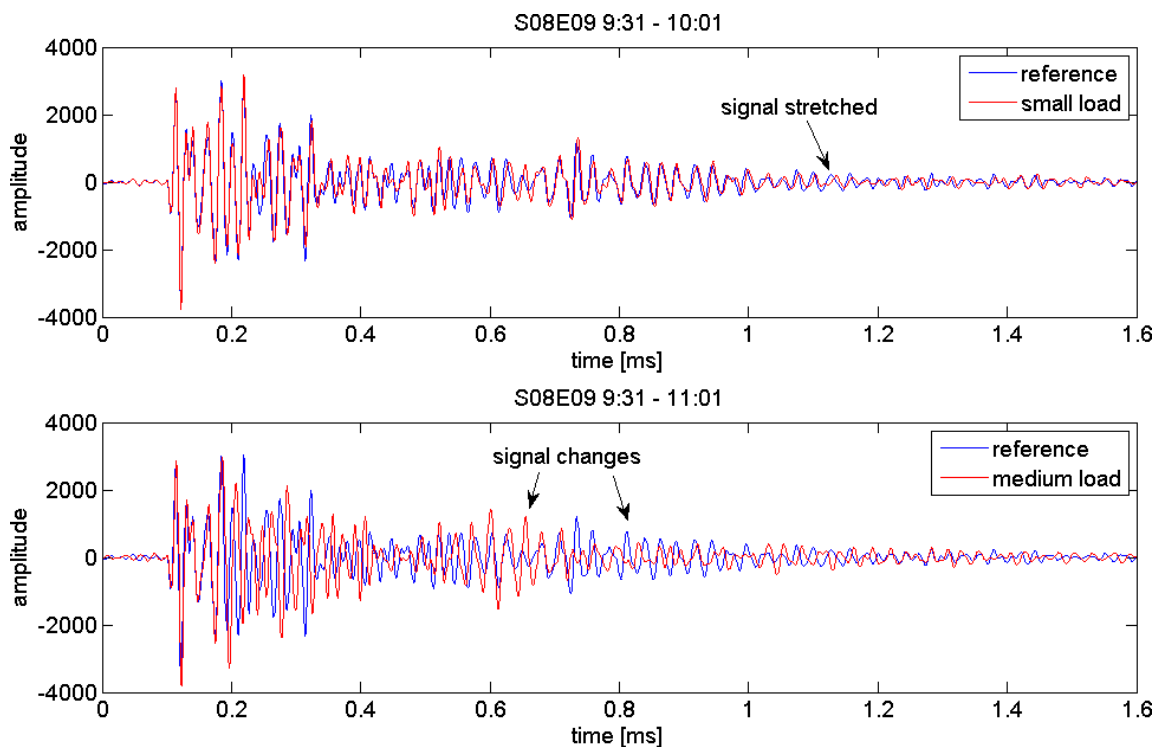


Abbildung 21: Beispiel für bearbeitete Messsignale vor der Belastung (jeweils blau), bei geringer Belastung (oben, rot) und mittlerer Belastung (unten, rot).

5.2 Laufzeit, Geschwindigkeit (t , v)

Aus den Daten wird mittels geeigneter Schwellwerte oder anderer Algorithmen die Laufzeit t der Ultraschallsignale vom Sender zu Empfänger bestimmt. Bei bekannter Laufstrecke s kann dann einfach die Geschwindigkeit $v = s/t$ bestimmt werden. Bei den zuerst eintreffenden Signalen handelt es sich stets um Kompressionswellen (p -Wellen, Geschwindigkeit v_p). Nur diese werden hier betrachtet. Bekannterweise sind erst große Änderungen im Material mit dieser Methode auflösbar.

5.3 Energie (E)

In einem festgelegten Zeitfenster nach dem Eintreffen der ersten Wellen wird die Energie des Signals bestimmt.

5.4 Kreuzkorrelation (CC)

Ausgehend von einer Referenzmessung am Anfang des Versuchs wird die Veränderung der Signale im Laufe des Versuchs mit Hilfe der Kreuzkorrelation bestimmt. Die Werte liegen zwischen 1 (identisch), 0 (kein Zusammenhang zwischen den Signalen) und -1 (Signal hat sich umgekehrt). Die Formel zur Berechnung ist identisch zu der, die bei Bestimmung der Geschwindigkeitsänderung in der Codawelleninterferometrie verwendet wird (Formel (1) in Abschnitt 2). Anders als dort wird aber das Messsignal nicht verändert.

5.5 Geschwindigkeitsänderung und Kreuzkorrelation mittels Codawelleninterferometrie (CWI-dv, CWI-CC)

Die Berechnung der Parameter Geschwindigkeitsänderung (CWI-dv) und Korrelationskoeffizient (CWI-CC) mit der Codawelleninterferometrie ist in Abschnitt 2

beschrieben. Der CWI-CC ist bei Codawelleninterferometrie mit fester Referenz im Verlauf der „normalen“ Korrelationskoeffizienten CC ähnlich, aber nicht identisch. Soweit nicht anders im Folgenden angegeben, wurde das schrittweise Verfahren („step-CWI“) eingesetzt, dabei lässt sich dann der Korrelationskoeffizient nicht mehr mit dem mit fester Referenz ermittelten Wert vergleichen. Eine Rückrechnung ist anders als bei der Geschwindigkeitsänderung nicht möglich.

5.6 Versuchparameter RWTH und Synchronisation

Die RWTH stellt nach jedem Versuch ihre Messergebnisse in Excel-Tabellen zum Vergleich zur Verfügung. Folgende Parameter wurden bisher bei der Auswertung berücksichtigt:

- Pressenlast
- Durchbiegung
- Querkraft

Zusätzlich wurden die Rissbilder und Simulationsdaten übergeben. Ergebnisse der Digital Image Correlation Messungen lagen zum Berichtszeitpunkt nicht vor.

Die Zeitsynchronisation geschah durch Abgleich der Computeruhrzeit der beiden Messrechner (RWTH und BAM9) unmittelbar vor Versuchsbeginn. Die Genauigkeit der Synchronisation kann sich bedingt durch die Betriebssysteme im Versuchsverlauf um einige Sekunden verschieben. In Anbetracht der Versuchsdauer (einige Stunden), der Haltedauer in verschiedenen Versuchsphasen (mehrere Minuten) und der Messintervalle zwischen zwei Ultraschall-Datensätzen (meist 2 Minuten) ist dies ohne Belang.

6 Ergebnisse

6.1 Voruntersuchungen

6.1.1 Vergleich der Ultraschall-Auswertungsparameter

In diesem Abschnitt erfolgt ein Vergleich zwischen den in den Abschnitten 5.1 bis 5.5 vorgestellten Auswerteparametern für die Ultraschallmessungen. Es sollte geklärt werden, ob sich die beiden aus der Codawelleninterferometrie bestimmten Parameter wirklich besser zur Versuchsverfolgung eignen als die konventionellen Parameter. Der Belastungsversuch an Träger DLT 1.2 dient hier als repräsentatives Beispiel. Die Ergebnisse für vier Transducerpaare werden im Folgenden diskutiert.

Abbildung 22 zeigt den Verlauf für die Kreuzkorrelation im Verlauf des Versuchs. An allen Transducerpaaren nimmt sie sofort bei Versuchsbeginn ab und verläuft dann stufenförmig (aber gegenläufig) analog zur Pressenkraft. Alle Verläufe zeigen zu einem bestimmten Zeitpunkt bei mittleren Pressenkräften (je nach Paar ca. 600 bis 900 kN) einen starken Abfall, d. h. eine sehr starke Signaländerung. Ob diese Änderung mit dem Auftreten von Rissen im entsprechenden Bereich korreliert, wird später diskutiert. Danach ist kein systematischer Zusammenhang mehr zwischen Pressenkraft und Korrelationskoeffizienten zu erkennen. In den ersten zwei Dritteln der Versuchspause „erholt“ sich der Korrelationskoeffizient wieder etwas – an den beiden rechten Paaren aber umgekehrt zu den beiden linken.

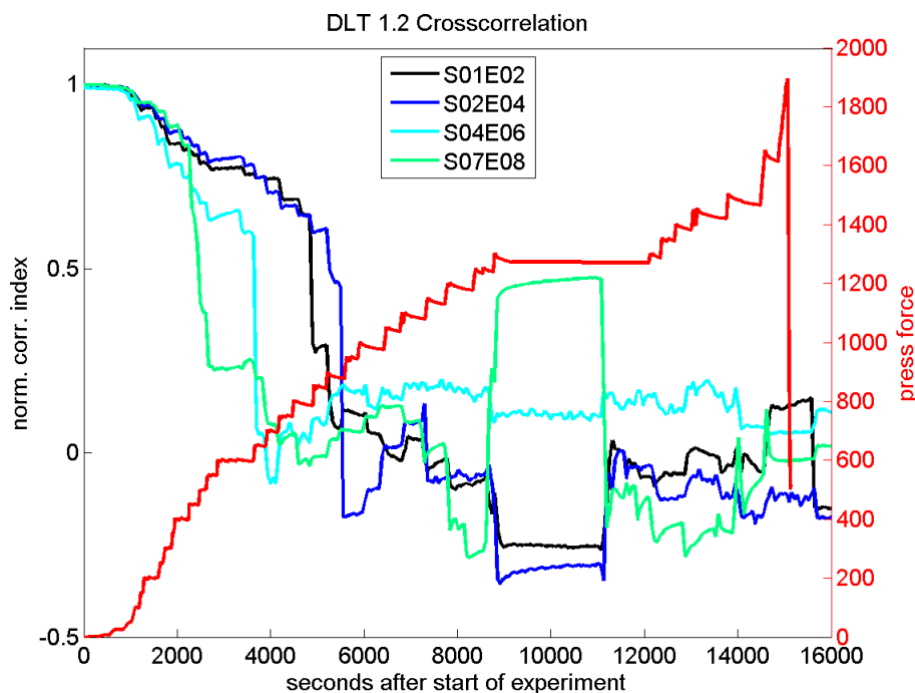


Abbildung 22: Verlauf der Kreuzkorrelation für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers. Legende SXXEYY: XX benennt den Sender Transducer, YY den Empfänger-Transducer. Platzierung s. Abbildung 10.

Aus den Laufzeiten der zuerst am Empfänger eintreffenden Signale (d. h. der Kompressionswellen) wurde die Geschwindigkeit für diesen Wellentyp berechnet. Zu berücksichtigen ist, dass ein Fehler bei der Ermittlung der Laufzeit um nur einen Datenpunkt (entspricht $1 \mu\text{s}$) bei den Entfernungen der hier betrachteten Transducerpaare schon einer Geschwindigkeitsänderung von ca. 20 m/s entspricht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 23 dargestellt. Erst ab einer Pressenlast von ca. 400 kN bis 900 kN lässt sich eine signifikante Geschwindigkeitsänderung feststellen. Die Geschwindigkeit nimmt stets mit steigender Pressenlast ab, je nach Transducerpaar in sehr unterschiedlichem Maße. In der Ruhephase erholen sich die Werte wieder, aber nicht auf die ursprünglichen Werte. Einige Transducerpaare (aber nicht alle) zeigen bei Versagen des Trägers einen Sprung in den Wellengeschwindigkeiten. Auffällig ist, dass die Änderungen an einem der Paare (S07E08) sehr viel geringer sind, als bei den Übrigen. Dies kann mit der Orientierung der Paare in Zusammenhang stehen.

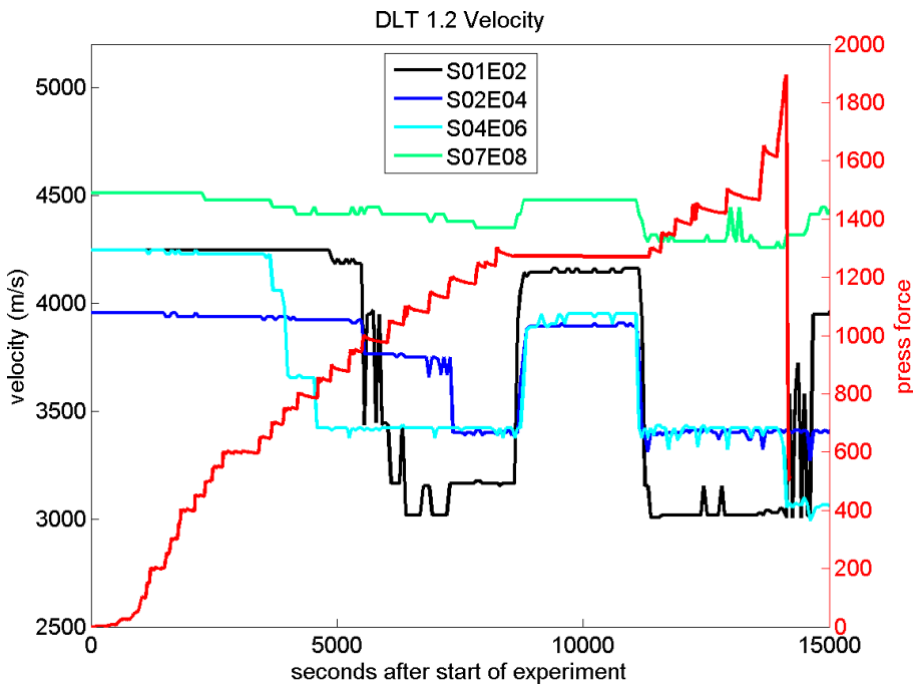


Abbildung 23: Verlauf der Kompressionswellengeschwindigkeit für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

Abbildung 24 zeigt den Verlauf des Energiegehalts der Signale. Hier sind zu Versuchsbeginn nur sehr geringe Änderungen detektierbar. Signifikante Änderungen sind erst ab gut 600 kN Pressenlast (rechte Transducerpaare) bzw. etwa 1000 kN (linke Transducerpaare) zu beobachten. Im Allgemeinen nimmt die Energie mit steigender Pressenlast ab. Nur bei dem vertikal unter der Lasteinleitung orientiertem S07E08 nimmt sie zunächst zu (Überpressen von Mikrorissen?). Der stufenförmige Anstieg der Pressenlast ist andeutungsweise nachvollziehbar, wird aber überlagert durch spontane, größere Änderungen. In der zweiten Versuchsphase ist der Verlauf uneinheitlich. Alle Transducerpaare zeigen aber beim Versagen des Trägers einen größeren Wertesprung. Dieser kann aber auch durch die Rückführung der Pressenkraft verursacht sein.

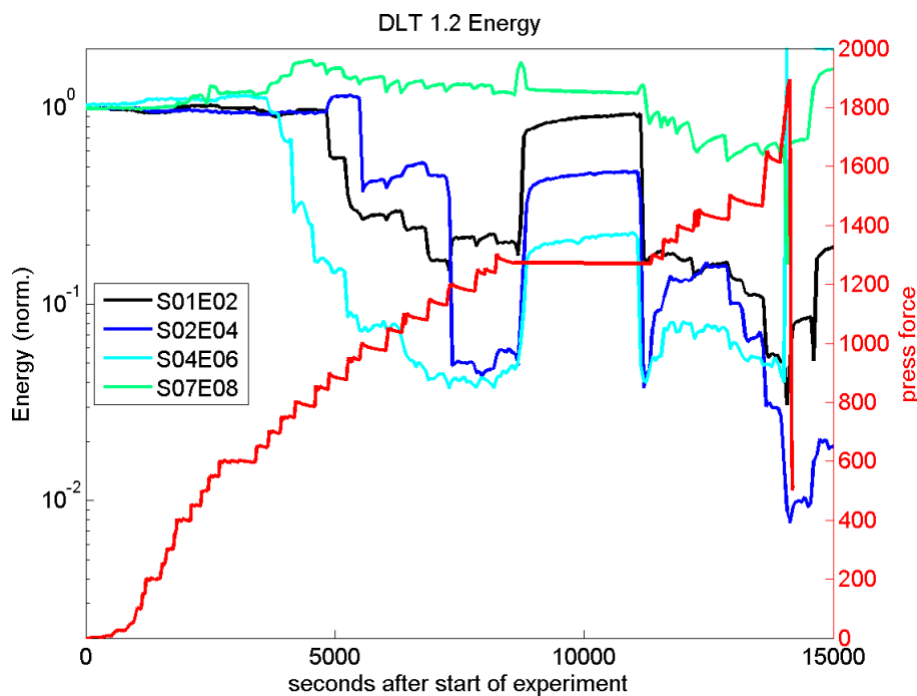


Abbildung 24: Verlauf des Energiegehalts der Signale (normiert auf den Wert zu Versuchsbeginn) für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

Abbildung 25: Verlauf der mit CWI (feste Referenz) ermittelten Änderung der Wellengeschwindigkeit (Vorzeichen verkehrt) für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers. Abbildung 25 zeigt die Änderung der Wellengeschwindigkeit im Versuchsverlauf, ermittelt mit der Codawelleninterferometrie mit fester Referenz vor Versuchsbeginn. Das Vorzeichen wurde verkehrt (Anstieg der Kurven bedeutete also Abnahme der Geschwindigkeit), um einen einfacheren grafischen Vergleich mit den RWTH-Versuchsparametern zu ermöglichen. Dies wurde auch für alle folgenden Abbildungen der Geschwindigkeitsänderung so gehandhabt. Schon geringe Änderungen der Pressenkraft zu Versuchsbeginn machen sich in den Wellengeschwindigkeiten bemerkbar (im hier gewählten Maßstab nicht erkennbar). Allerdings werden bereits bei mittleren Pressenkräften keine aussagekräftigen Werte mehr ermittelt, da die Geschwindigkeitsänderungen für den Algorithmus zu groß werden.

Abbildung 26 zeigt den zugehörigen mit der CWI ermittelten Korrelationskoeffizienten. Der Verlauf ähnelt dem des klassischen Korrelationskoeffizienten (Abbildung 22), ist aber nicht identisch. Auch hier sind aber bei den Transducern in der rechten Hälfte des instrumentierten Teils des Trägers schnell sehr große Änderungen zu beobachten, während später (ab etwa 1000 kN Pressenlast) kein quantitativer Zusammenhang mehr zu der Änderung der Pressenlast zu beobachten ist.

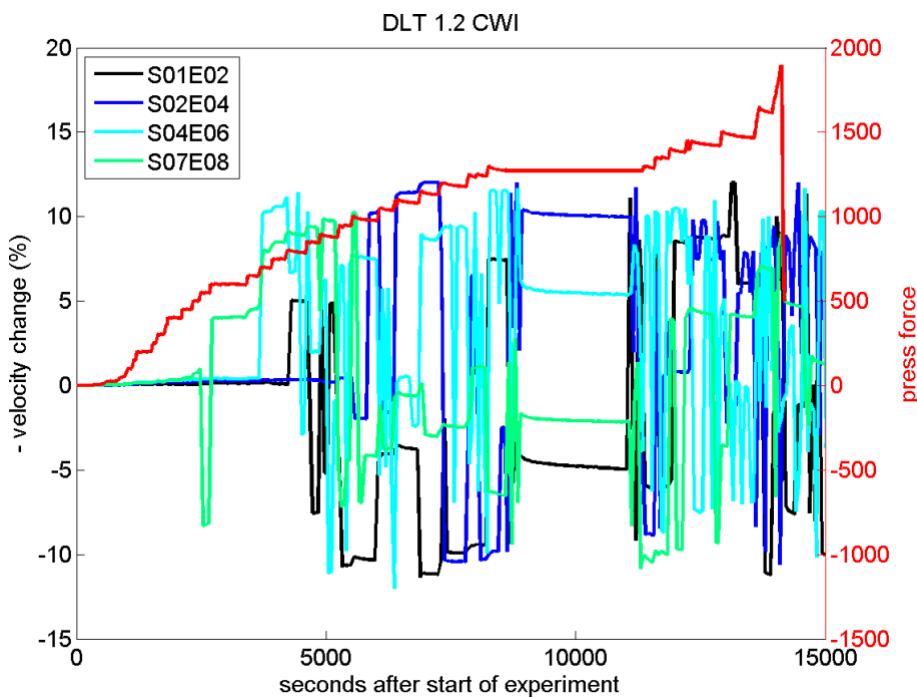


Abbildung 25: Verlauf der mit CWI (feste Referenz) ermittelten Änderung der Wellengeschwindigkeit (Vorzeichen verkehrt) für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Presskraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

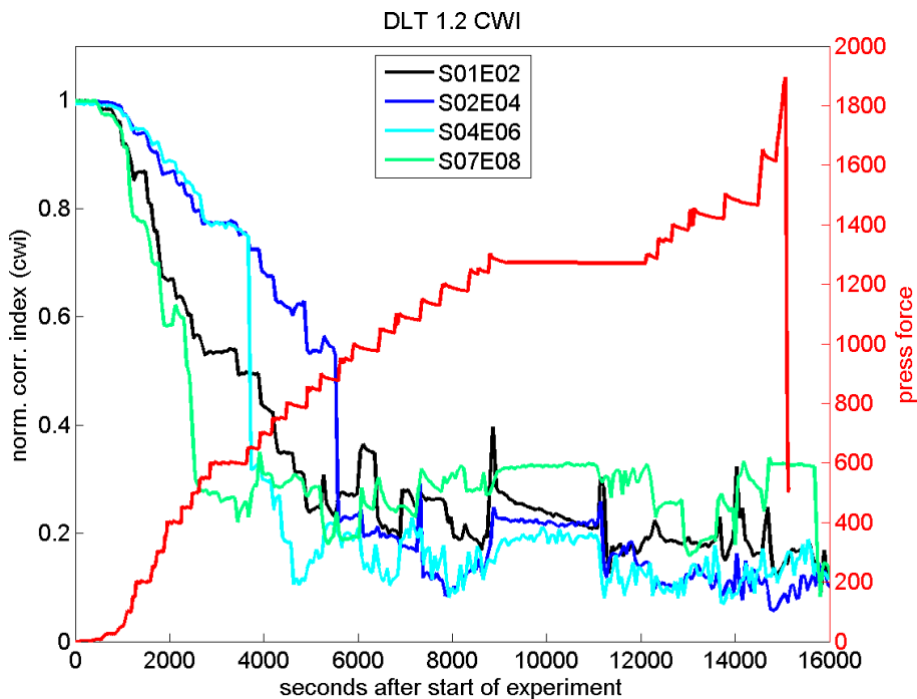


Abbildung 26: Verlauf des mit CWI (feste Referenz) ermittelten Korrelationskoeffizienten für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Presskraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

Abbildung 27 zeigt die mit schrittweiser Referenz ermittelten und dann aufmultiplizierten Geschwindigkeitsänderungen. Die schrittweise Erhöhung der Presskraft ist bei allen Transducerpaaren in der ersten Versuchsphase (bis ca. 1300 kN) klar nachvollziehbar und bei drei Paaren auch noch in der zweiten Versuchsphase. Der Verlauf zeigt bei allen Paaren bei Versagen der zweiten (instrumentierten) Trägerhälfte bei ca. 1900 kN klare Anomalien. Ansonsten treten Anomalien bei Wiederanfahren des Versuchs nach der

Pause auf. Bei zwei Transducerpaaren (an beiden ist Transducer 2 beteiligt) zeigt sich bei ca. 900 kN eine weitere Anomalie (spontane Zunahme der Geschwindigkeit, Pfeil in Abbildung 27). Bei dieser Last zeigen die Rissbilder im Umfeld von Transducer 2 noch keine Risse. Es könnte sein, dass hier bei diesem Zeitschritt Fehlmessungen vorliegen, die sich bei der schrittweisen Referenz bei allen folgenden Messungen als verändertes Niveau bemerkbar machen. Methoden zur automatischen Identifikation solcher Fehlmessungen liegen noch nicht vor. Bei den Versuchen an den Trägern DLT 1.3 bis 1.5 traten solche Effekte aufgrund verbesserter Messtechnik nicht auf. Abbildung 28 zeigt ein Detail der in Abbildung 27 dargestellten Daten als Beleg, dass schon geringe Pressenkräfte sich in Geschwindigkeitsänderungen niederschlagen.

Abbildung 29 zeigt die bei der mit der CWI und schrittweiser Referenz ermittelten Korrelationskoeffizienten im Versuchsverlauf. Anders als bei Abbildung 22 und Abbildung 26 (Bezug auf Versuchsbeginn) werden hier nur Veränderungen gegenüber der vorherigen Messung angezeigt. In der Versuchspause und in Phasen konstanter Belastung liegt der Koeffizient nahe 1 (keine Änderung). Bei Laständerungen oder Rissbildung zeigen sich Ausschläge nach unten. Diese Ausschläge sind für die einzelnen Paare unterschiedlich, da Belastung und Rissbildung nicht homogen erfolgen.

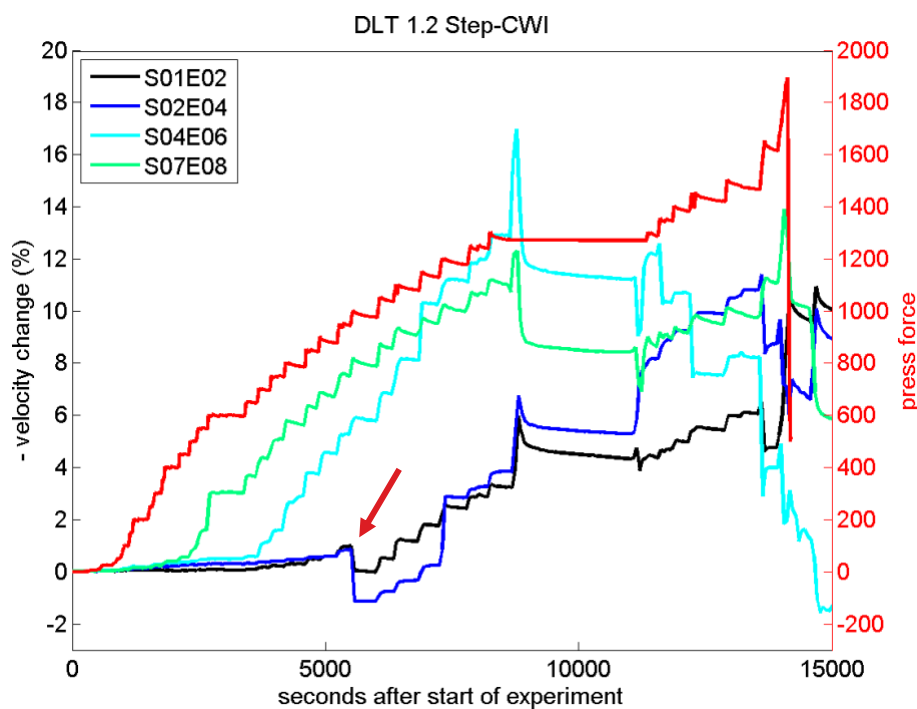


Abbildung 27: Verlauf der mit CWI (schrittweise Referenz) ermittelten Änderung der Wellengeschwindigkeit (Vorzeichen verkehrt) für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Presskraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

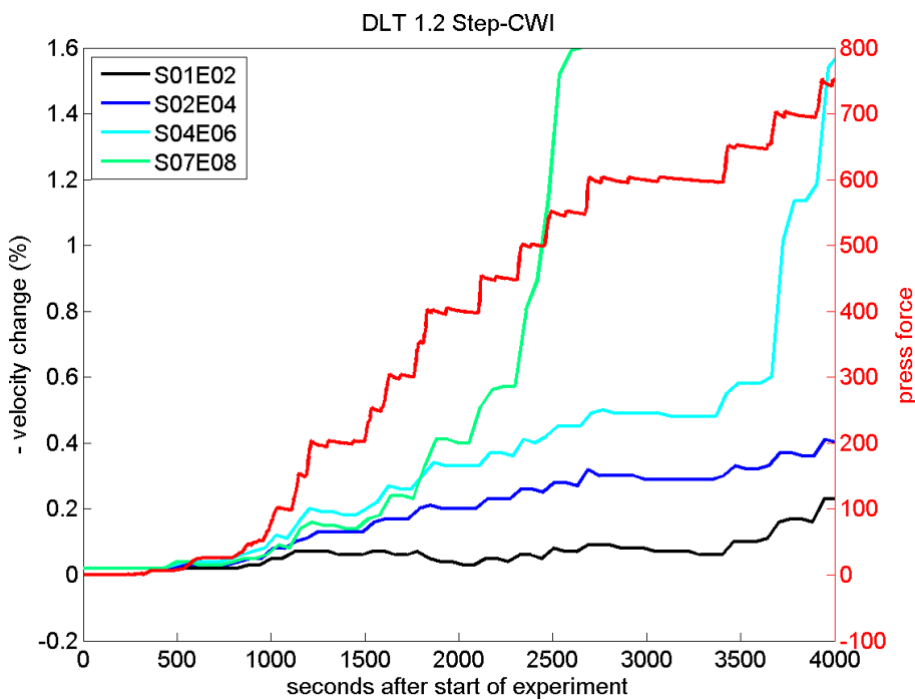


Abbildung 28: Wie Abbildung 27, Detail erste Versuchsphase (geringe Pressenkraft).

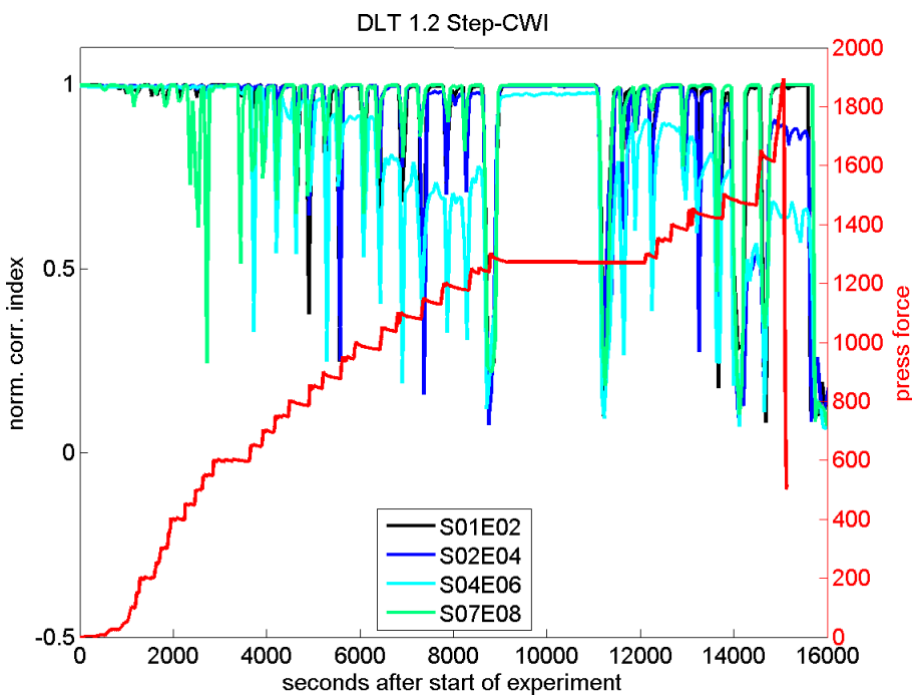


Abbildung 29: Verlauf der mit CWI (schrittweise Referenz) ermittelten Korrelationskoeffizienten für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

Die mit der schrittweisen Codawelleninterferometrie ermittelten Geschwindigkeitsänderungen zeigen den deutlichsten Zusammenhang zu den Versuchsparametern. Daher werden diese Werte auch primär für die Auswertung der einzelnen Versuche herangezogen.

6.1.2 Messungen während der Vorspannung

Zusätzlich zu den Messungen während der Belastungsversuche wurde an Träger DLT 1.1 auch der gesamte Zeitraum zwischen Anlieferung in der Versuchshalle der RWTH und dem Belastungsversuch verfolgt. Während des Aufbringens der Vorspannung wurde in engem Zeitraster gemessen. Die Ergebnisse sind in Abbildung 30 dargestellt. Anders als für die Belastungsversuche wurde hier die Codawelleninterferometrie mit fester Referenz (kurz vor dem Aufbringen der Vorspannung) eingesetzt und die Geschwindigkeitsänderung positiv aufgetragen. Die Phasen der Vorspannung sind mit Pfeilen in der Abbildung markiert.

Die Vorspannung macht sich an den unterschiedlich positionierten und unterschiedlich orientierten Transducerpaaren erwartungsgemäß unterschiedlich bemerkbar. Am deutlichsten ist die Vorspannung in den Daten von Transducerpaar 2-4 verfolgbar, das in Richtung des Spanngliedes orientiert ist. Bei Transducerpaar 4-5 (unterhalb des Spanngliedes, Orientierung vertikal) führt die Vorspannung zunächst zu einer Geschwindigkeitsabnahme, ab 160 kN dann aber wie bei den anderen Paaren zu einer Geschwindigkeitszunahme. Zwischenzeitlich kam es bei diesem Transducerpaar (wie bei etlichen anderen, hier nicht gezeigten Transducerpaaren auch) zu Ausfällen. Vergleichsdaten sind für diese Überwachungsphase nicht verfügbar. Die Daten zeigen aber das Potential der Methodik zur Überwachung der Vorspannung.

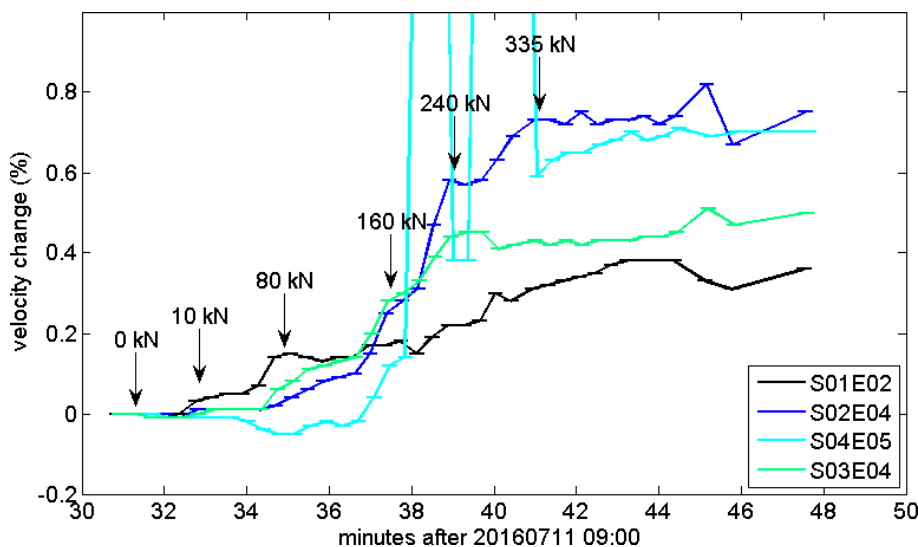


Abbildung 30: Mit CWI (feste Referenz) ermittelte Geschwindigkeitsänderungen während des Aufbringens der Vorspannung für vier Transducerpaare in DLT 1.1. Legende SXXEYY: XX benennt den Sender Transducer, YY den Empfänger-Transducer. Platzierung s. Abbildung 10.

6.1.3 Messungen in der Ruhephase

Die Ergebnisse der Codawelleninterferometrie in der Phase zwischen Vorspannung und Versuch für DLT 1.1 (Transducerpaar 2-4, Auswertung mit der CWI-Methode mit fester Referenz) sind zur Illustration in Abbildung 31 und Abbildung 32 dargestellt. Referenz ist die erste Messung vor Aufbringen der Vorspannung. In den ersten Werten der Geschwindigkeitsänderung (Abbildung 31) erkennt man an dem steilen Anstieg das Aufbringen der Vorspannung, an das sich ein weiterer positiver Kriechvorgang anschließt. Am Tag 2 (12.7.) erscheint in der Geschwindigkeitsänderung ein kurzer Peak, der sich im

Korrelationskoeffizienten (Abbildung 32) durch eine veränderte Steigung bemerkbar macht (Zeitpunkt der Verpressung?). Eine weitere sprunghafte Veränderung zeigt sich an Tag 4 (14.7.). Die Ursache hierfür ist unbekannt. Danach ist in beiden Werten ein rückwärtiger Verlauf in Richtung der Ausgangswerte zu beobachten. Wellenförmige Ausschläge haben eine Periode von 24-Stunden und sind wohl auf Temperaturschwankungen in der Versuchshalle zurückzuführen.

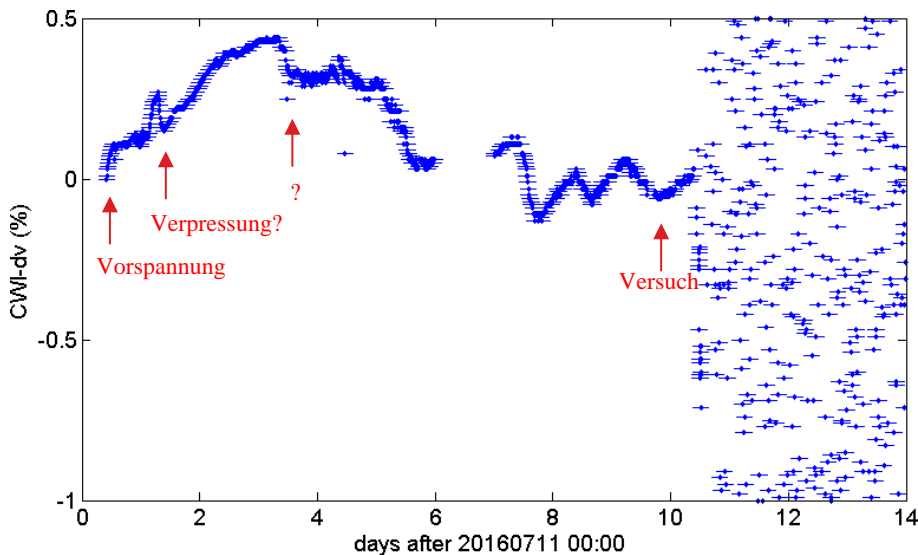


Abbildung 31: Träger DLT 1.1: Geschwindigkeitsänderung ermittelt mit CWI für Transducerpaar 2-4 zwischen Vorspannung und Belastungsversuch.

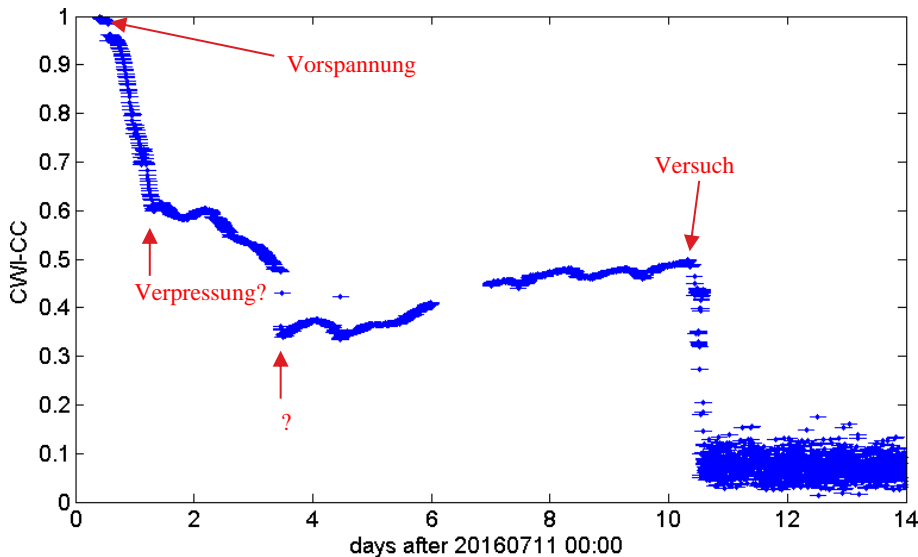


Abbildung 32: Träger DLT 1.1: Korrelationskoeffizient ermittelt mit CWI für Transducerpaar 2-4 zwischen Vorspannung und Belastungsversuch.

6.2 Träger DLT 1.1

Der Belastungsversuch an DLT 1.1 wurde am 24.11.2015 durchgeführt und dient für das hier beschriebene Forschungsvorhaben zur Ermittlung geeigneter Messparameter für die Ultraschallüberwachung. Leider kam es während der Messungen wiederholt zu Ausfällen an verschiedenen Transducerpaaren, so dass die Daten nur beschränkt verwertbar sind. Abbildung 33 zeigt den Vergleich der mit der schrittweisen CWI ermittelten Wellengeschwindigkeitsänderung für eins der Transducerpaare mit der Durchbiegung des Trägers. Der Verlauf ist nur in der ersten Versuchsphase qualitativ vergleichbar. Die schrittweise Lasterhöhung ist nicht nachvollziehbar. Auch für die anderen Transducerpaare ergaben sich bei Auswertung mit CWI anders als während des Aufbringens der Vorspannung (s. Abschnitt 6.1.2) keine verwertbaren Ergebnisse.

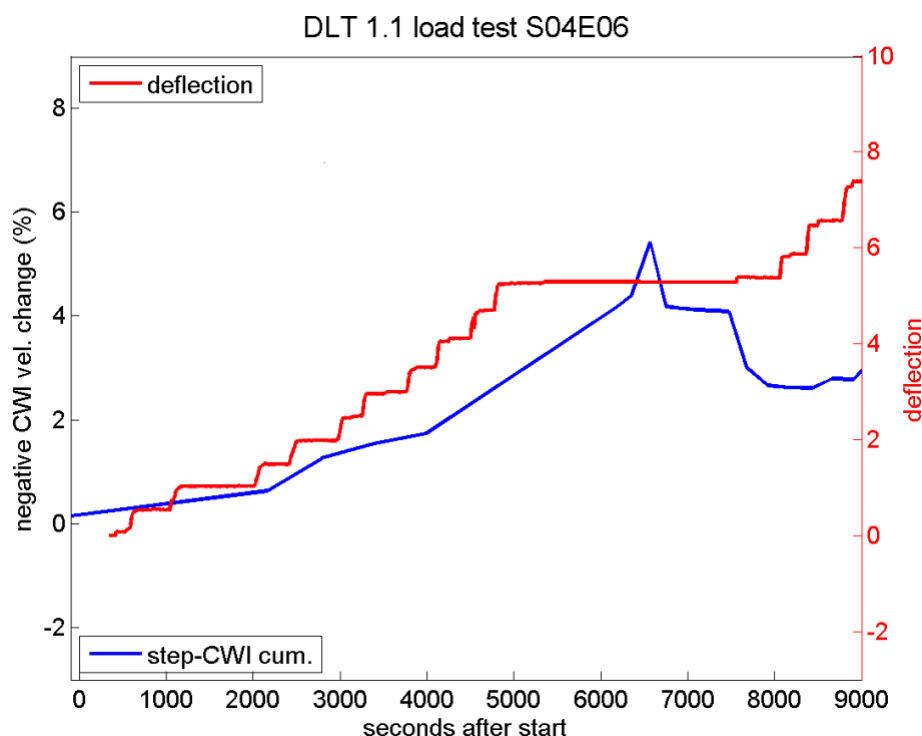


Abbildung 33: Träger DLT 1.1: Wellengeschwindigkeitsänderung zwischen Transducerpaar 4-6 ermittelt mit schrittweiser CWI im Vergleich zur Durchbiegung des Trägers während des Belastungsversuchs. Legende SXXEYY: XX benennt den Sender Transducer, YY den Empfänger-Transducer. Platzierung s. Abbildung 10.

Bei der Auswertung mit der konventionellen Kreuzkorrelation ließen sich die Phasen des Belastungsversuches zumindest qualitativ für mehrere Transducerpaare verfolgen. Die einzelnen Abschnitte des Versuchs finden sich im Verlauf des Korrelationskoeffizienten wieder. Da hiermit aber keine quantitativen Aussagen möglich sind, wurden die Daten nicht weiter ausgewertet.

Die Ursache für die schlechte Datenqualität während des Belastungsversuchs war nicht zu klären, da alle Geräte nach Rückverbringung in die BAM einwandfrei funktionierten. Sicherheitshalber wurden ein Teil der Geräte und die Verkabelung vor dem nächsten Versuch ausgetauscht. Eine Konsequenz für zukünftige praxistaugliche Monitoringsysteme ist die Integration einer automatisierten Qualitätskontrolle in Echtzeit.

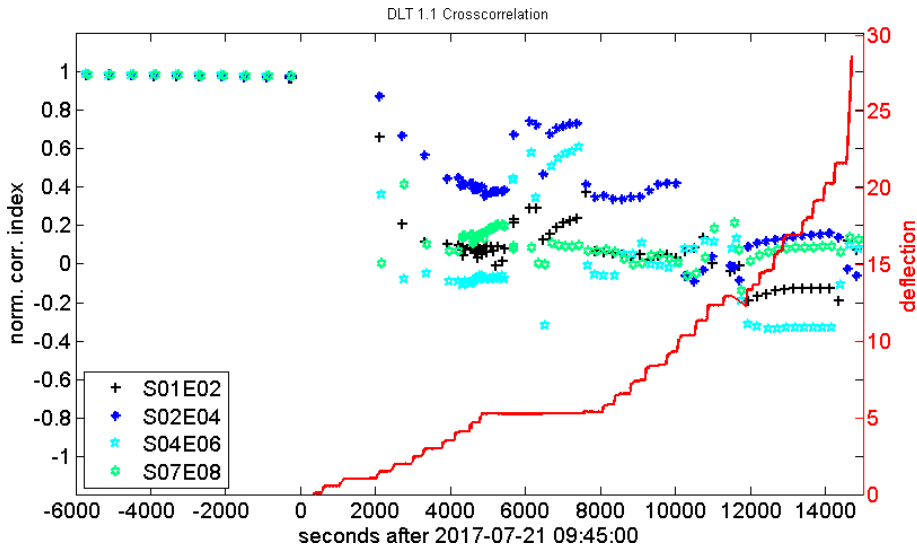


Abbildung 34: Träger DLT 1.1: Verfolgung des Belastungsversuchs mit Kreuzkorrelation für vier Transducerpaare im Vergleich zur Durchbiegung des Trägers während des Belastungsversuchs.

6.3 Träger DLT 1.2

Für den Belastungsversuch an Träger DLT 1.2 (durchgeführt am 04.08.2016) wurden Teile des Equipments ausgetauscht (siehe voriger Abschnitt). Zusätzlich wurden die Messintervalle verkürzt.

Schon bei Betrachtung der Kreuzkorrelation für die gleichen Transduceranordnungen wie in DLT 1.1 sieht man eine deutlich verbesserte Datenqualität (Abbildung 35). Eine Änderung der Ultraschallsignale zeigt sich schon unmittelbar bei der ersten Laststufe. Alle Transducerpaare zeigen schon in der ersten Versuchsphase ein starke Änderung (Abfall des Korrelationskoeffizienten auf Werte unter 0.2 – kaum noch Ähnlichkeit zum Referenzsignal vor Versuchsbeginn). Dies geschieht bei den Transducerpaaren rechts in der instrumentierten Trägerhälfte deutlich eher als bei den zur Trägermitte hin orientierten Paaren. Im weiteren Verlauf sind dann allerdings außer während der Versuchspause keine signifikanten Änderungen mehr erkennbar.

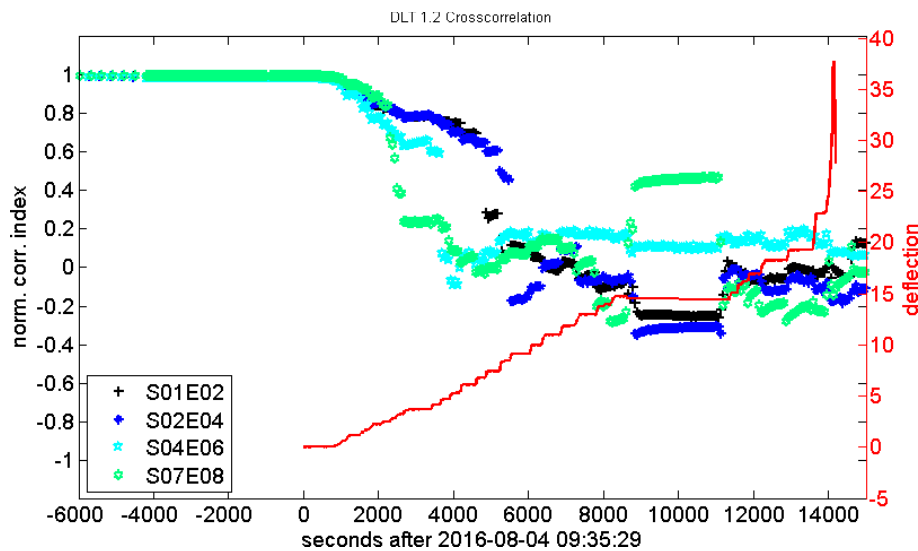


Abbildung 35: Träger DLT 1.2: Verfolgung des Belastungsversuchs mit Kreuzkorrelation für vier Transducerpaare im Vergleich zur Durchbiegung des Trägers während des Belastungsversuchs. Legende SXXEYY: XX benennt den Sender Transducer, YY den Empfänger-Transducer. Platzierung s. Abbildung 10.

Die Ergebnisse für die CWI mit schrittweiser Referenz wurden schon weiter vorne vorgestellt (Abbildung 27 - Abbildung 29). Es zeigte sich, dass mit der ausgetauschten Messausrüstung sich der Versuchsverlauf nun deutlich besser verfolgen lässt, als bei DLT 1.1. Die Methode zeigt schon bei geringen Lasten signifikante Parameteränderungen. Die Laststufen lassen sich gut verfolgen, bei einigen Transducerpaaren sogar bis kurz vor Versuchsende. Allerdings zeigt ein Teil der Daten Sprünge (Abbildung 27). Daher ist ein quantitativer Vergleich der einzelnen Transducerpaare oder eine flächenhafte Darstellung nicht sinnvoll. Daher wurde die Messausrüstung um einen Verstärker/Filter ergänzt, mit dem ab DLT 1.3 solche Sprünge nicht mehr auftraten.

6.4 Träger DLT 1.3

Die Versuchsanordnung in Träger DLT 1.3 wurde gegenüber den vorher untersuchten Trägern verändert. Es wurden 20 (vorher 8) Transducer in einem annähernd regelmäßigen Raster eingebaut. Zudem wurde die Messausrüstung um einen Messverstärker/Filter ergänzt.

6.4.1 Einzelmessungen

In diesem Abschnitt erfolgt ein Vergleich der Messungen mit einzelnen Transducerpaaren mit ausgewählten von der RWTH gemessenen Parametern. Die Betrachtung beschränkt sich hier auf das zentral gelegene Transducerpaar 8-9 (Kennung S08E09). Um die Lesbarkeit der Grafiken zu vereinfachen wurde wie bisher das Vorzeichen der Geschwindigkeitsänderung gewechselt, damit sich die Größen gleichsinnig mit zunehmender Belastung verändern.

Abbildung 36 zeigt einen Vergleich des zeitlichen Verlaufs der mit CWI am Transducerpaar ermittelten Wellengeschwindigkeitsänderung mit der Querkraft in der entsprechenden Trägerhälfte. Es zeigt sich, dass zwischen aufgebrachtener Kraft und der Wellengeschwindigkeitsänderung ein nichtlinearer Zusammenhang besteht. Einer etwa linearen Krafterhöhung mit der Zeit steht ein exponentieller Anstieg der Wellengeschwindigkeit spätestens ab einer Querkraft von 500 kN gegenüber. Ab etwa 600 kN versagt die CWI mit linearer Referenz, während mit der schrittweisen Methode der Versuch bis etwa 900 kN verfolgt werden kann.

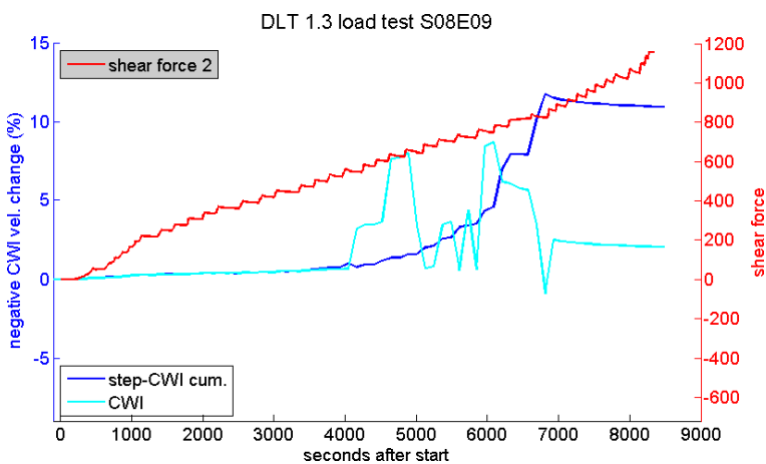


Abbildung 36: DLT 1.3, Transducerpaar 8-9: Zeitlicher Verlauf der Änderung der Wellengeschwindigkeit (ermittelt mit CWI mit fester und schrittweiser Referenz) im Vergleich zur Scherkraft in der rechten Trägerhälfte. Legende SXXEYY: XX benennt den Sender Transducer, YY den Empfänger-Transducer. Platzierung s. Abbildung 13.

Abbildung 37 zeigt einen Ausschnitt der Daten aus Abbildung 36 in der frühen Phase des Versuchs mit veränderter Achsenskalierung. Der direkte Zusammenhang zwischen Querkraft und Geschwindigkeitsänderung ist offensichtlich.

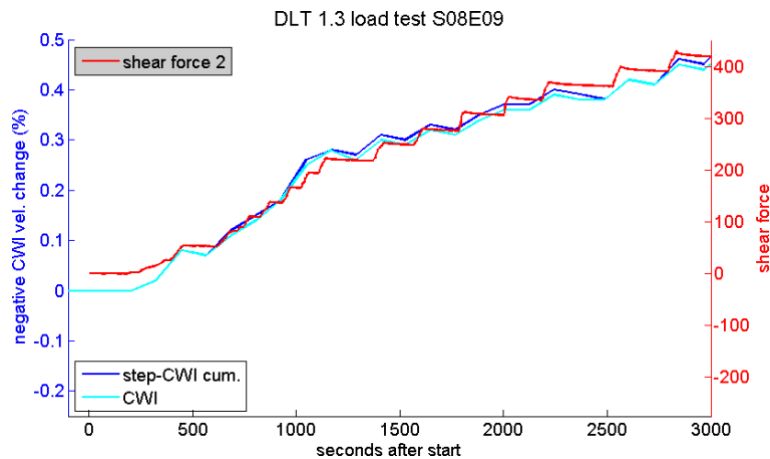


Abbildung 37: Wie Abbildung 36, Ausschnitt mit veränderter Achsenskalierung.

Abbildung 38 zeigt einen Vergleich des zeitlichen Verlaufs der mit CWI am Transducerpaar ermittelten Wellengeschwindigkeitsänderung mit der Durchbiegung in der entsprechenden Trägerhälfte. Letztere zeigt wie die Wellengeschwindigkeitsänderung einen nichtlinearen Anstieg. Wie der in Abbildung 39 dargestellte Ausschnitt aus den Daten zeigt, erfolgt der Übergang von linearem zu nichtlinearem Verhalten aber zu einem anderen Zeitpunkt. Die Geschwindigkeitsänderung steigt ab etwa 4000 s exponentiell, die Durchbiegung ab etwa 6600 s.

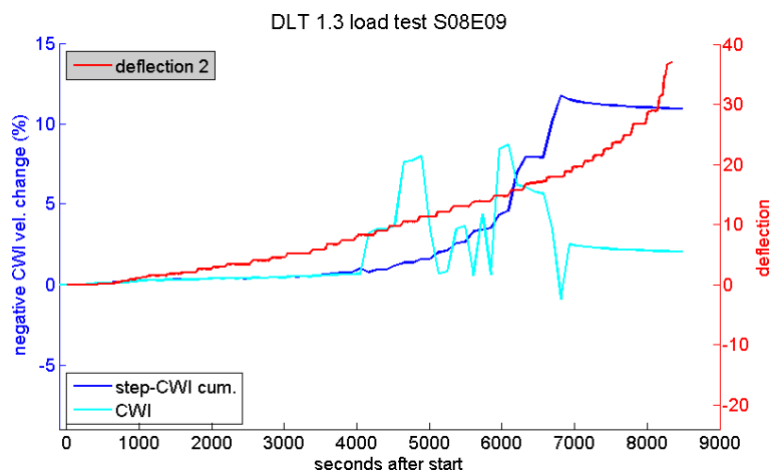


Abbildung 38: DLT 1.3, Transducerpaar 8-9: Zeitlicher Verlauf der Änderung der Wellengeschwindigkeit (ermittelt mit CWI mit fester und schrittweiser Referenz) im Vergleich zur Durchbiegung der rechten Trägerhälfte.

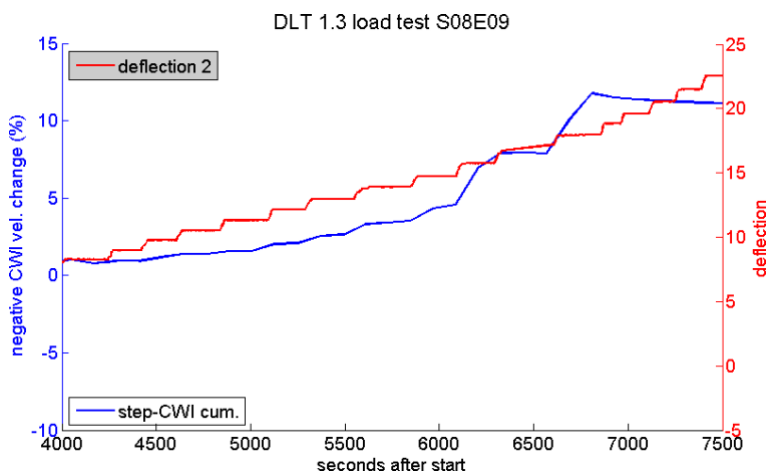


Abbildung 39: Ausschnitt der Daten aus Abbildung 38 mit veränderter Achsenskalierung (ohne CWI mit fester Referenz).

6.4.2 Flächenhafte Auswertung

Die oben dargestellten Verhältnisse sind nicht einheitlich für alle Transducerpaare. Die Verläufe sind für einige Paare in Abbildung 40 dargestellt. Die Größe der Geschwindigkeitsänderung variiert über den Untersuchungsbereich und ist rechts unten im Feldbereich des Trägers gegen über dem Lasteintrag und links oben im Stützbereich des Trägers gegenüber der Stütze (Transducerpaare S16E17 bzw. S01E18) am größten. Am geringsten ist sie unten links in der Biegedruckzone (S12E20).

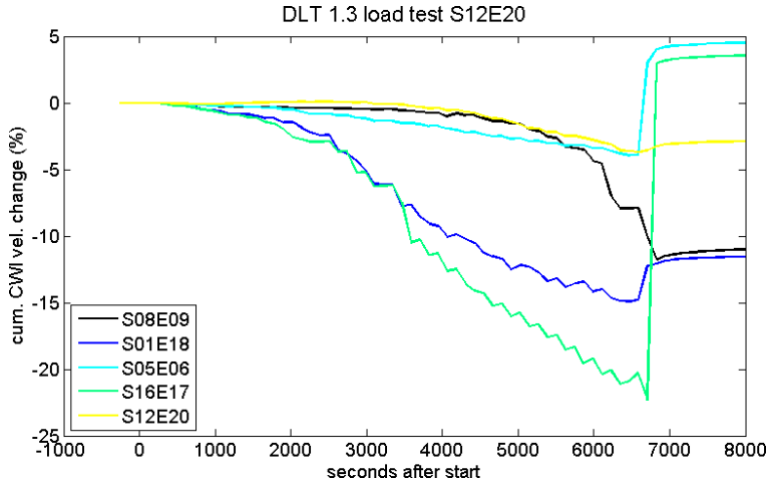


Abbildung 40: Geschwindigkeitsänderung über die Zeit für ausgewählte Transducerpaare.

Für die Messungen mit allen verfügbaren Transducerpaaren lassen sich für ausgewählte Zeitpunkte (Belastungszustände) die Geschwindigkeitsänderungen (und ggf. andere Parameter) entnehmen und als 2D-Schnitt darstellen. Dazu werden die ermittelten Werte dem Mittelpunkt des jeweiligen Transducerpaares zugeordnet, flächenhaft interpoliert und farbkodiert dargestellt. Die hier dargestellte Auswertung bezieht sich auf das schrittweise CWI-Verfahren. Das Vorzeichen der Geschwindigkeitsänderung wurde zur Vereinheitlichung wie in Abschnitt 5.1 umgekehrt.

Ab Abbildung 41 ist die flächenhafte Verteilung der Geschwindigkeitsänderung bei steigendem Pressendruck dargestellt. Das mittlere Lager ist unten links durch ein Dreieck, die rechte Presse rechts oben durch einen Pfeil angedeutet. Ab Abbildung 46 ist das von der RWTH aufgenommenen Rissbild (rote Linien überlagert). Dabei ist zu beachten, dass in dem rot umrandeten Bereich Risse durch das auf den Träger aufgebrachte Muster für die Digital Image Correlation verdeckt sind. Zum Vergleich werden jeweils die vom IMB, RWTH Aachen, zur Verfügung gestellten Simulationsergebnisse (Hauptdruckdehnungen bzw. Risse) dargestellt. Die Abbildungen zeigen einen vertikalen Schnitt in Richtung der Längsachse durch die Mitte des Trägers. Abbildung 41 zeigt den Referenzzustand vor Versuchsbeginn (keine Geschwindigkeitsänderung). Bei geringer Belastung (250 kN Pressenkraft, Abbildung 42 und Abbildung 43) sind noch keine Risse erkennbar. Die Änderung der Wellengeschwindigkeit ist aber bereits signifikant, im Flächenbild aber nur in feinerer Auflösung (Abbildung 43) sichtbar. Die größten Änderungen (in den Abb. Positiv = Geschwindigkeitsabnahme) sind oben über dem Lager und unten unter der Presse lokalisiert, also in den Bereichen der stärksten Biegezugbeanspruchung. In den Simulationsergebnissen sind erwartungsgemäß noch keine Rissbildung und nur sehr geringe Druckstauchungen (im gewählten Farbcode nicht zu sehen) erkennbar.

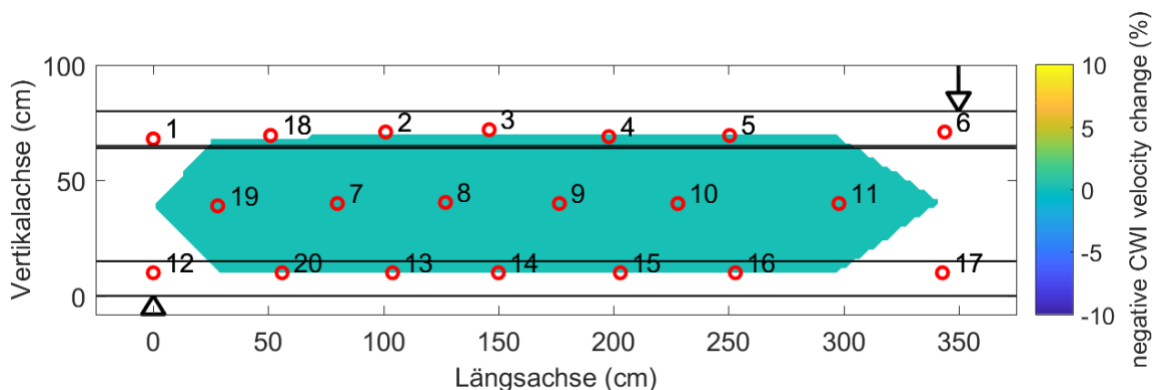


Abbildung 41: DLT 1.3, Geschwindigkeitsänderung 9:35 Uhr (0 kN Pressenkraft, Referenzzustand).

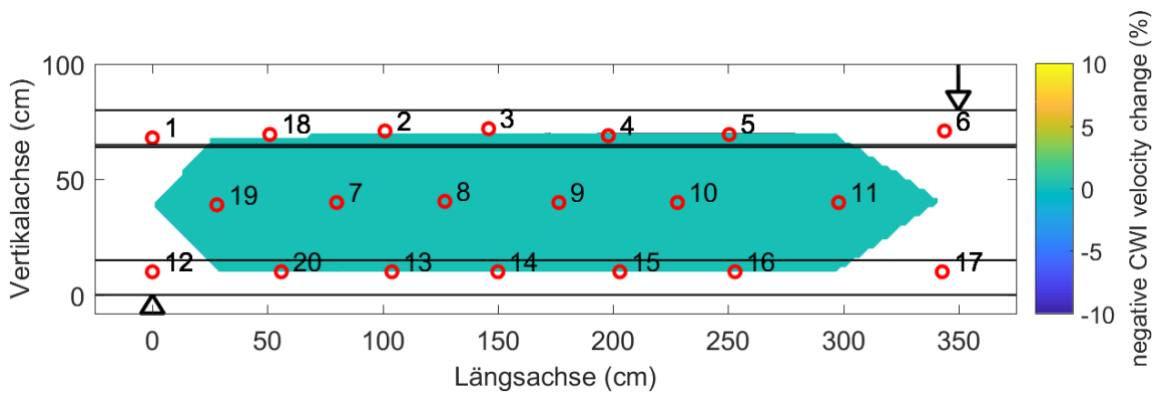


Abbildung 42: DLT 1.3, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 250 kN Pressenkraft). Sehr geringe Geschwindigkeitsänderung (< 0,5%). Keine Risse erkennbar.

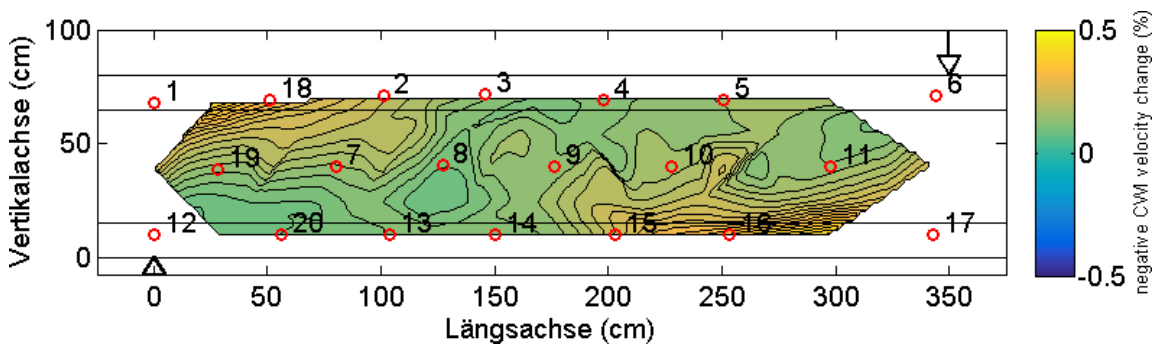


Abbildung 43: Wie Abbildung 42, Farbcode und Abstand der Isolinien verfeinert.

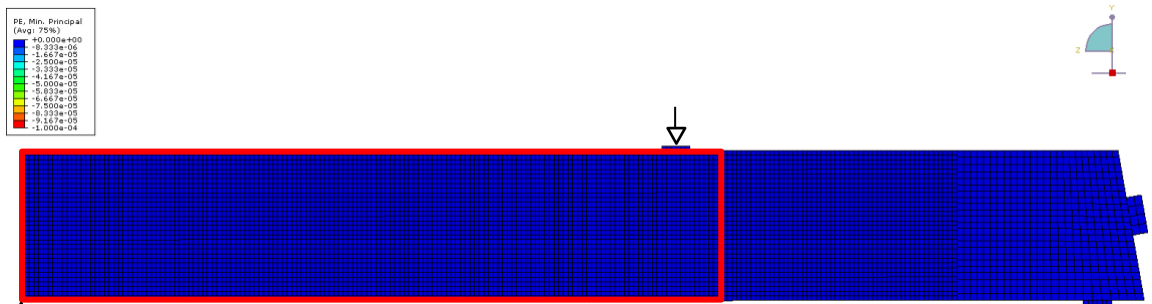


Abbildung 44: DLT 1.3, FE-Simulation, Hauptdruckdehnung bei 250 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

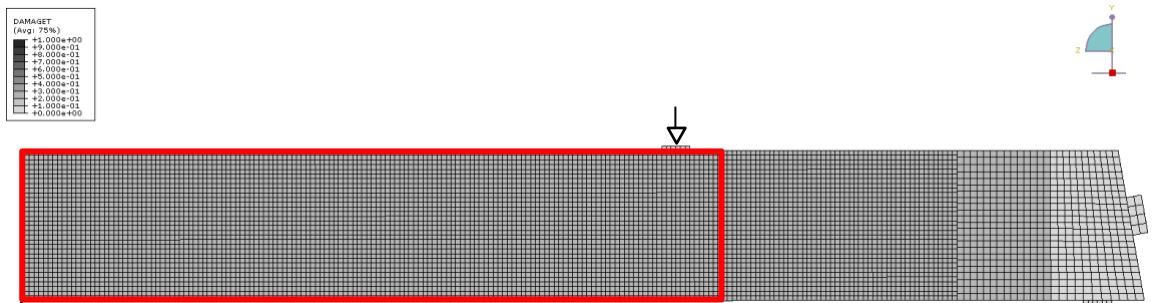


Abbildung 45: DLT 1.3, FE-Simulation, Rissbildung bei 250 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

Die Effekte verstärken sich mit zunehmender Pressenkraft bis 1000 kN (Abbildung 46 bis Abbildung 52). Nun treten auch zunehmend Risse auf, deren Position und Ausrichtung

mit den Zonen der größten Geschwindigkeitsänderung eindeutig korrelieren. In der FE-Simulation treten Risse erst später auf als in der Realität (vergl. Abbildung 46 und Abbildung 48 bzw. Abbildung 49 und Abbildung 51).

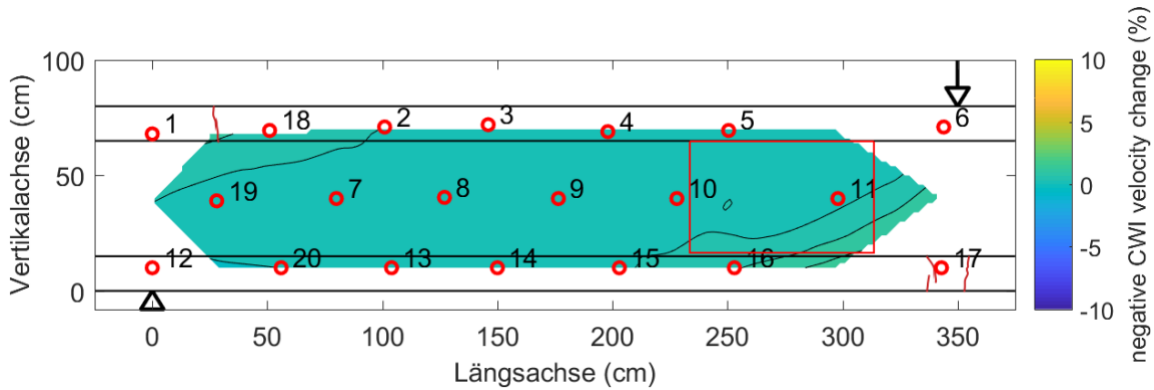


Abbildung 46: DLT 1.3, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 500 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen vor allem rechts unten und links oben bis ca. 1%. Rote Linien: Rissbild RWTH (im rot umrandeten Rechteck wurde wegen DIC-Muster kein Rissbild aufgenommen).

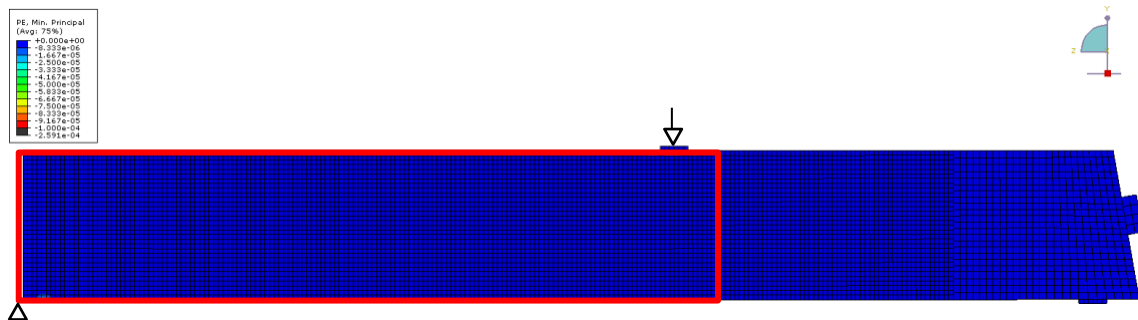


Abbildung 47: DLT 1.3, FE-Simulation, Hauptdruckdehnung bei 500 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

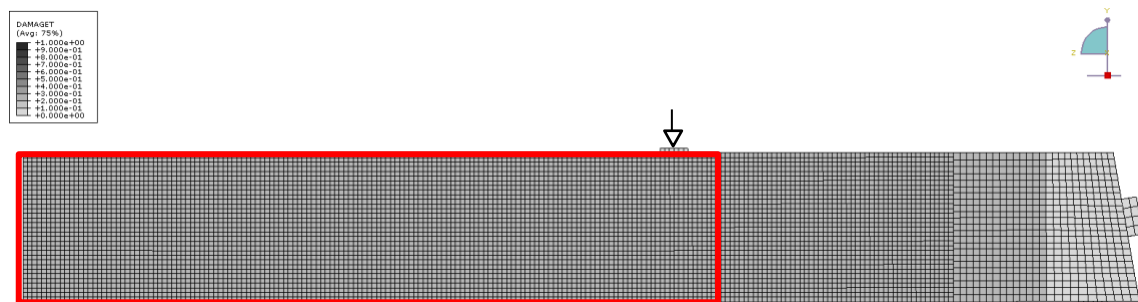


Abbildung 48: DLT 1.3, FE-Simulation, Rissbildung bei 500 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

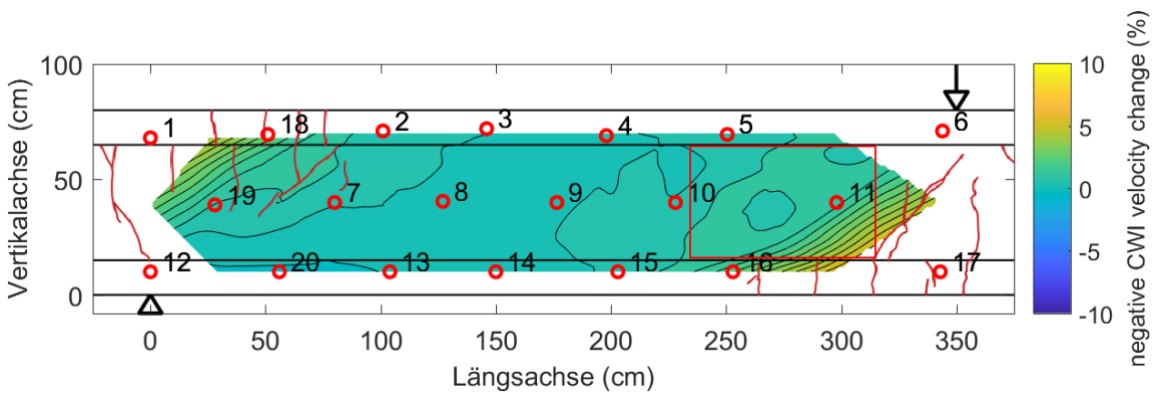


Abbildung 49: DLT 1.3, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 750 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis ca. 5%. Rote Linien: Rissbild RWTH (im rot umrandeten Rechteck wurde wegen DIC-Muster kein Rissbild aufgenommen).

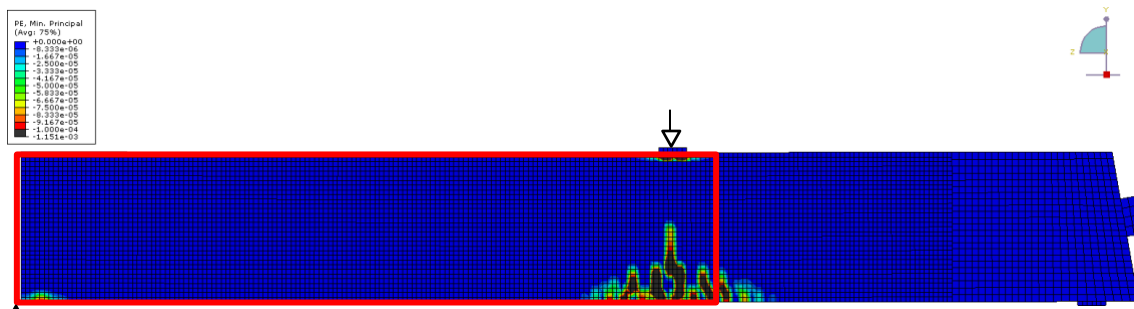


Abbildung 50: DLT 1.3, FE-Simulation, Hauptdruckdehnung bei 750 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

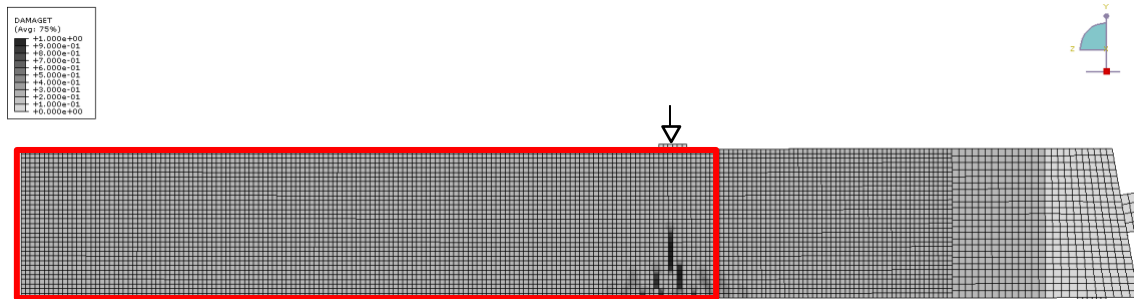


Abbildung 51: DLT 1.3, FE-Simulation, Rissbildung bei 750 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

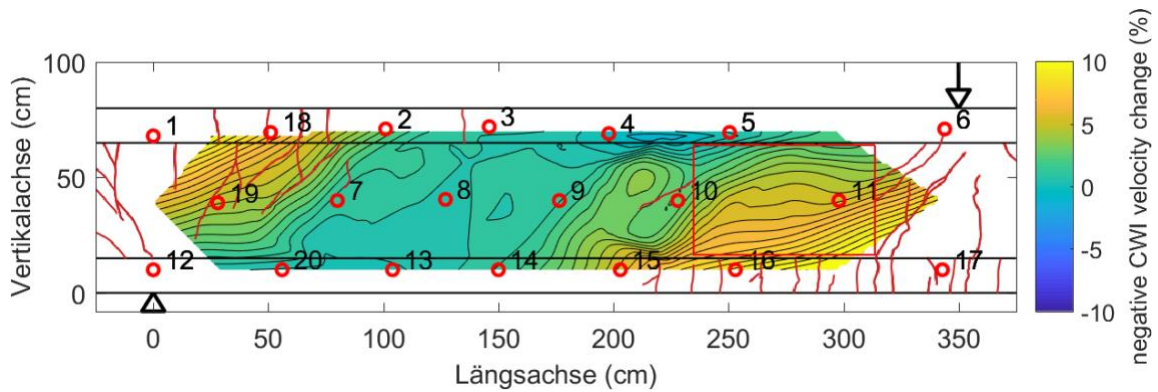


Abbildung 52: DLT 1.3, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 1000 kN Pressenkraft). Geschwindigkeitsänderungen bis ca. 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH (im rot umrandeten Rechteck wurde wegen DIC-Muster kein Rissbild aufgenommen).

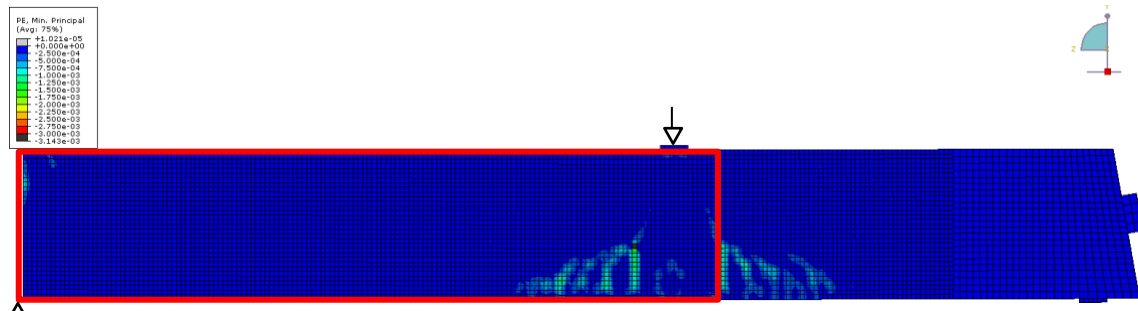


Abbildung 53: DLT 1.3, FE-Simulation, Hauptdruckdehnung bei 1000 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

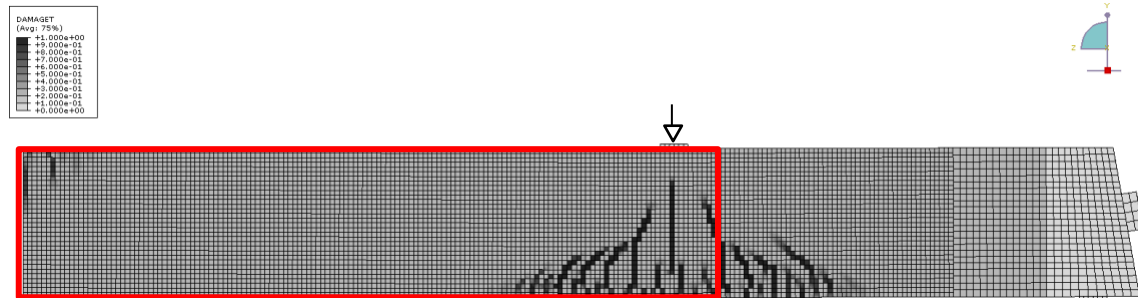


Abbildung 54: DLT 1.3, FE-Simulation, Rissbildung bei 1000 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

Bei noch größerer Last bis hin zum Versagen treten nun zusätzlich auch in der Mitte des Trägerfeldes Anomalien in der Geschwindigkeitsverteilung auf, bevor hier Risse sichtbar werden (Abbildung 55). Die engen Farbwechsel weisen darauf hin, dass hier bestimmte Wellenwege durch Risse in bestimmten Richtungen „versperrt werden“. Die Ausrichtung dieser Anomalien passt nicht vollständig, aber überwiegend zu dem in Abbildung 58 sichtbaren Rissbild im Bruchzustand. In den Simulationsergebnissen sind diese Risse nicht erkennbar.

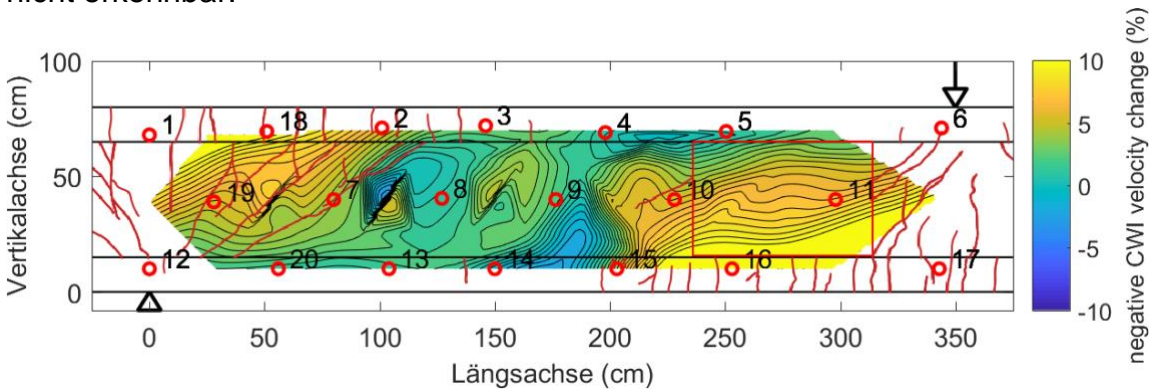


Abbildung 55: DLT 1.3, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 1250 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis ca. 15%. Rote Linien: Rissbild RWTH (im rot umrandeten Rechteck wurde wegen DIC-Muster kein Rissbild aufgenommen).

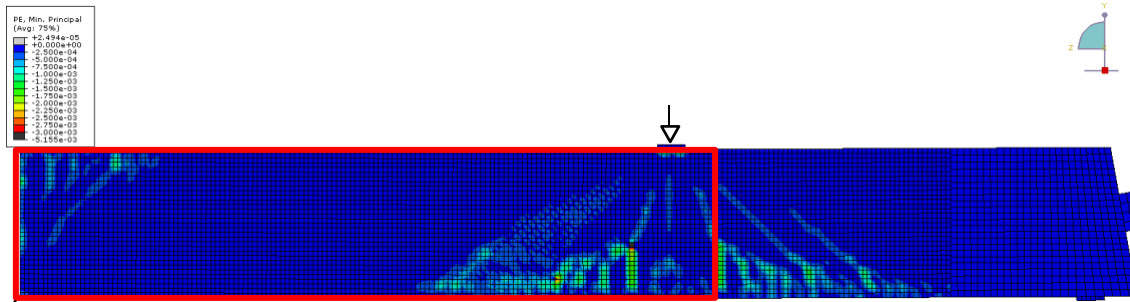


Abbildung 56: DLT 1.3, FE-Simulation, Hauptdruckdehnung bei 1250 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

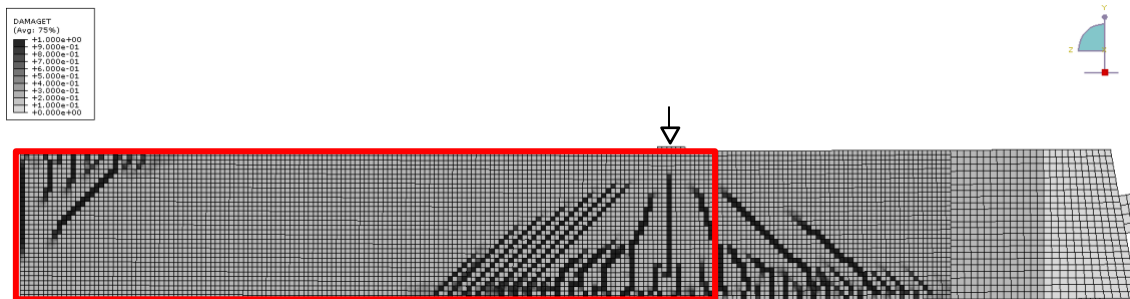


Abbildung 57: DLT 1.3, FE-Simulation, Rissbildung bei 1250 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

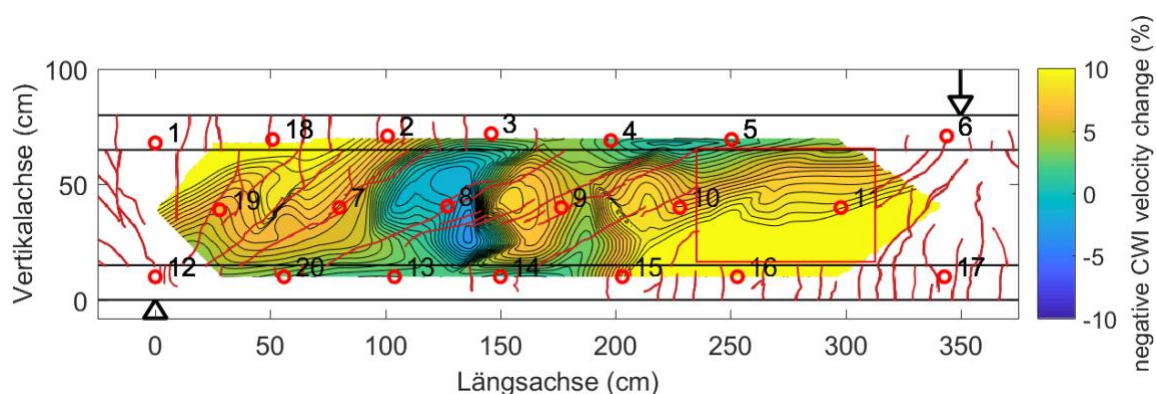


Abbildung 58: DLT 1.3, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 1500 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis ca. 20%. Rote Linien: Rissbild RWTH (im rot umrandeten Rechteck wurde wegen DIC-Muster kein Rissbild aufgenommen).

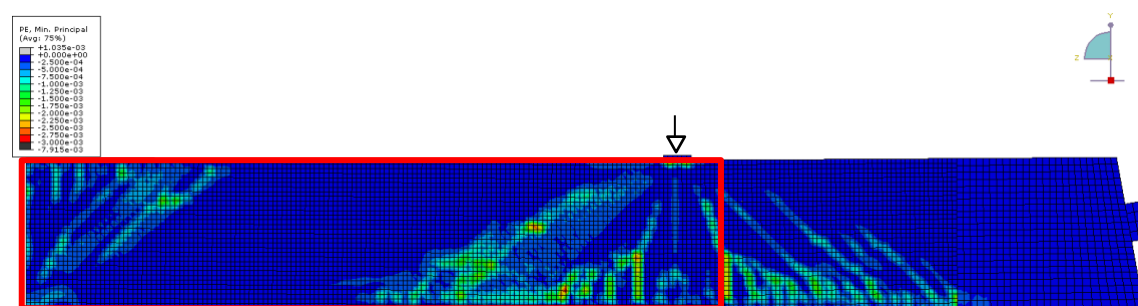


Abbildung 59: DLT 1.3, FE-Simulation, Hauptdruckdehnung bei 1500 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

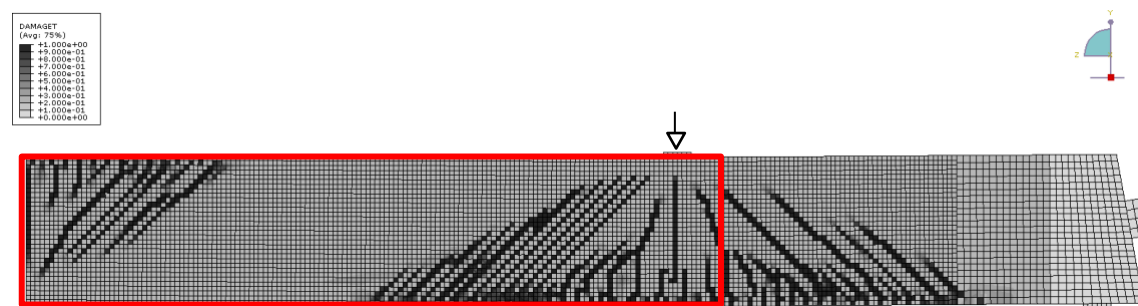


Abbildung 60: DLT 1.3, FE-Simulation, Rissbildung bei 1500 kN Pressenkraft. Simulation: Abaqus, M. Herbrand, RWTH. Rot umrandet: In den Abbildungen der Ultraschallergebnisse dargestellter Bereich.

6.5 Träger DLT 1.4

6.5.1 Auswertung Einzeltransducerpaar

Abbildung 61 zeigt für das Transducerpaar 8-9 einen Vergleich der mit der schrittweisen CWI ermittelten Geschwindigkeitsänderung mit der Durchbiegung des Trägers im rechten Feld. Die Charakteristik beider Versuchsgrößen ist weitgehend identisch. Bis etwa 5500 s (Pressenlast 110 kN) zeigt sich ein direkter, linearer Zusammenhang. Danach steigt die Geschwindigkeitsabnahme schneller als die Durchbiegung, die allerdings nun auch verstärkt zunimmt. Kurz vor Versagen des Trägers zeigt sich in der Geschwindigkeitsänderung eine signifikante Anomalie.

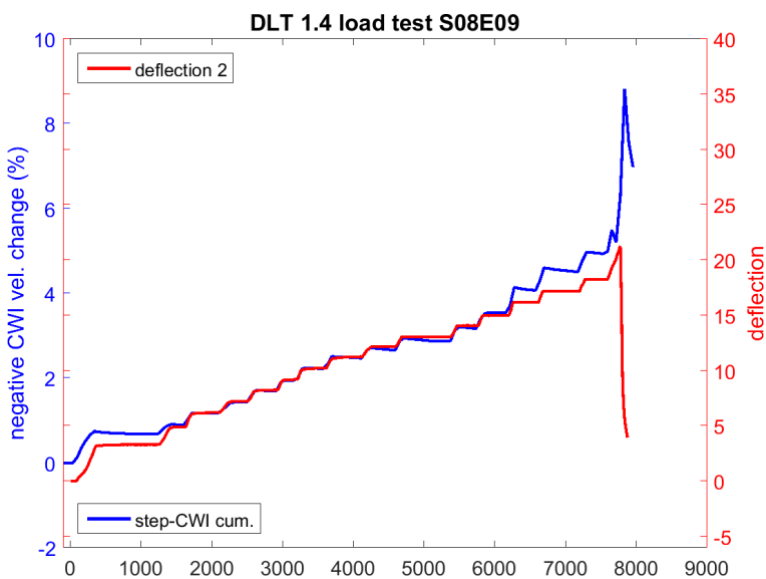


Abbildung 61: DLT 1.4: Vergleich Wellengeschwindigkeitsänderung – Durchbiegung über den Versuchsverlauf. Legende SXXEYY: XX benennt den Sender Transducer, YY den Empfänger-Transducer. Platzierung s. Abbildung 16.

6.5.2 Flächenhafte Darstellung

Die flächenhafte Darstellung der Geschwindigkeitsänderung erfolgt analog zu Träger DLT 1.3 (siehe Abschnitt 6.4.2) in Abbildung 62 bis Abbildung 68. Auch der Farbcode ist identisch. Der Träger wurde zur Belastung um seine Längsachse gedreht, um mit einer Vielzahl auf dem Spannboden stehenden Hydraulikpressen eine Linienlast von oben zu simulieren. Für die Darstellung hier wurde der Träger „zurückgedreht“, ist also wie in Abbildung 15 orientiert.

Schon bei geringen Pressenkräften (Abbildung 62) ist eine Geschwindigkeitszunahme im Bereich zwischen Transducer 9 und 10 (etwa in der Mitte zwischen mittlerem und rechtem Lager) zu erkennen (in der Abb. negativ = Geschwindigkeitszunahme). Da in der Zugzone eigentlich eine Geschwindigkeitsabnahme zu erwarten ist, ist dieser Effekt im Moment nicht erklärlich. Sobald eine Auswertung der übrigen Sensorik der RWTH vorliegt, erfolgt ein erneuter Abgleich.

In den folgenden Bildern treten mit steigender Pressenkraft Zonen größerer Geschwindigkeitsabnahme primär im Dreieck Transducer 4-8-9 und zwischen Transducer 1 und 2 auf. Hier sind am Trägerrand auch die ersten Risse zu beobachten. Mit weiter steigenden Lasten ziehen sich diese Risse fokussiert in die Zonen der Geschwindigkeitsabnahme hinein. Bedingt durch das veränderte Lastszenario sind diese

Zonen breiter als bei DLT 1.3. Die Korrelation zwischen Ausrichtung der Risse und Geometrie der Zonen der Geschwindigkeitsabnahme ist auch hier sehr hoch.

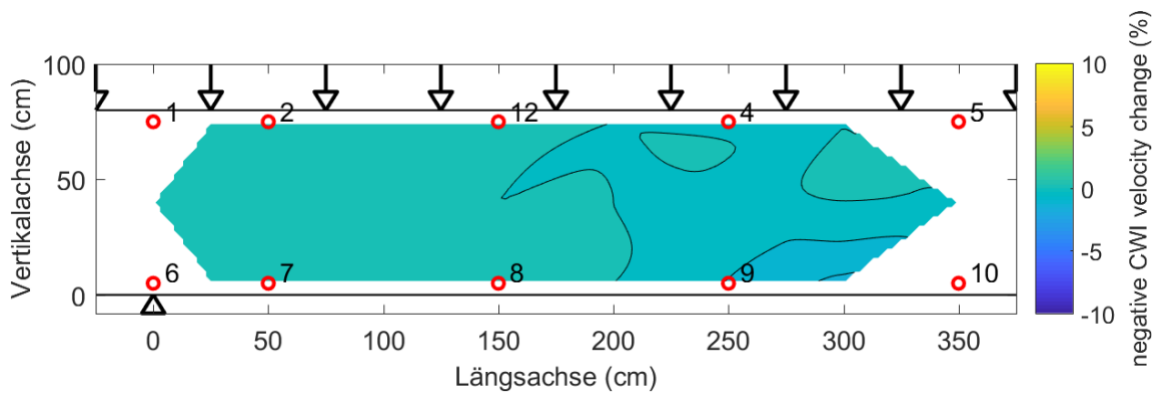


Abbildung 62: DLT 1.4, Geschwindigkeitsänderung bei 10 kN Pressenkraft.

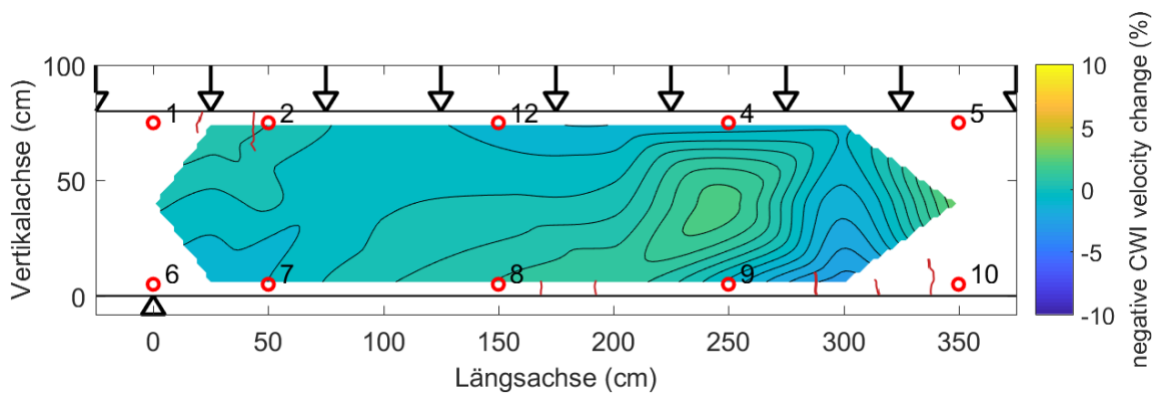


Abbildung 63: DLT 1.4, Geschwindigkeitsänderung bei 51 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 2%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

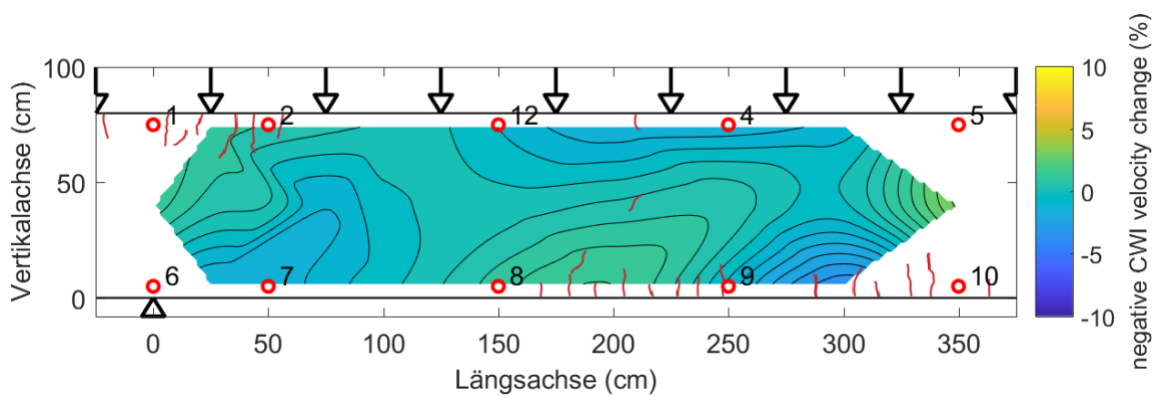


Abbildung 64: DLT 1.4, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 60 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 3%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

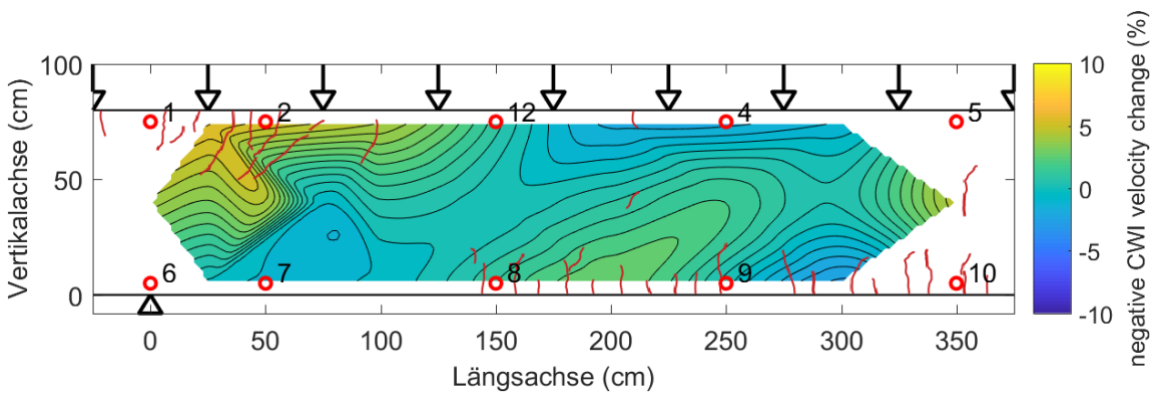


Abbildung 65: DLT 1.4, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 90 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 5%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

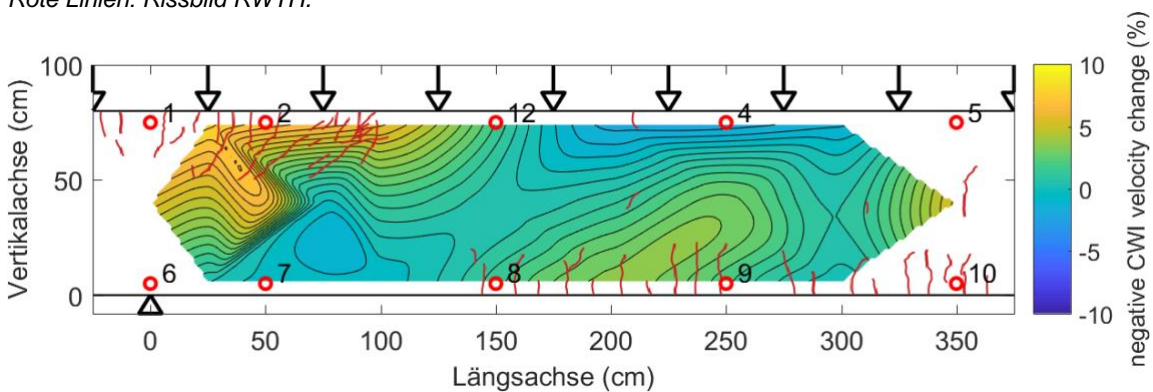


Abbildung 66: DLT 1.4, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 120 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 8%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

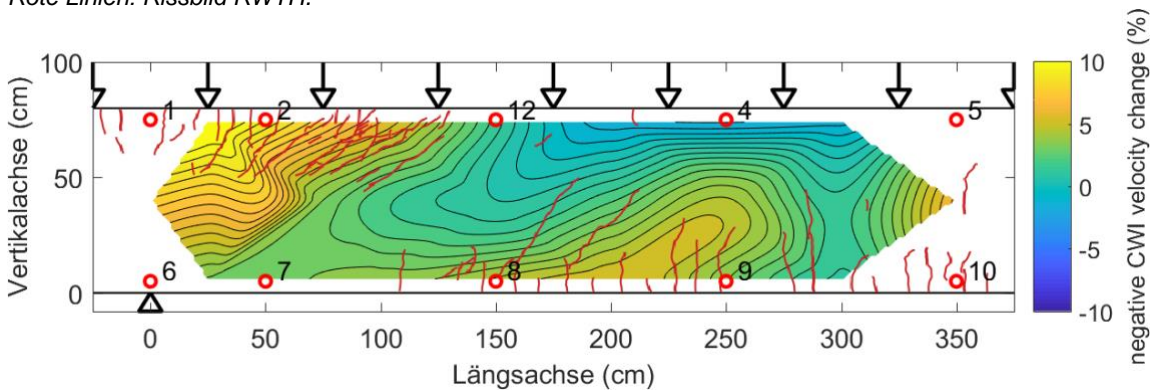


Abbildung 67: DLT 1.4, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 150 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

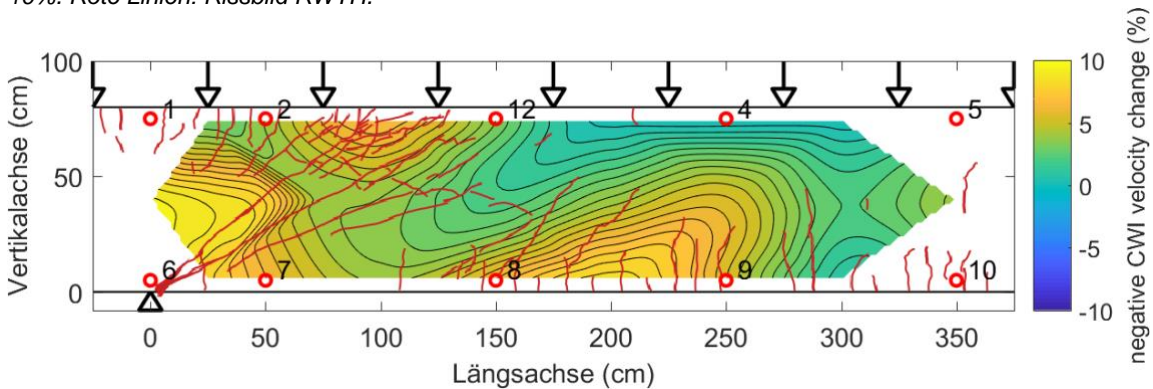


Abbildung 68: DLT 1.4, Geschwindigkeitsänderung bei Bruchlast. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

6.6 Träger DLT 1.5

6.6.1 Auswertung Einzeltransducerpaar

Abbildung 69 zeigt für das Transducerpaar 8-9 einen Vergleich der mit der schrittweisen CWI ermittelten Geschwindigkeitsänderung mit der Durchbiegung des Trägers im rechten Feld. Die Charakteristik beider Versuchsgrößen ist identisch. Allerdings zeigt sich ab 4000 s (Pressenlast 90 kN) eine zunehmend schnelle Geschwindigkeitsabnahme, die sich nur annähernd in der Durchbiegung widerspiegelt, aber auch diese nimmt ab hier verstärkt zu. In dieser Darstellung ist anders als bei DLT 1.4 kein signifikantes Voranzeichen für das Versagen des Trägers erkennbar. Dies kann aber an der Zeitauflösung von 2 Minuten liegen.

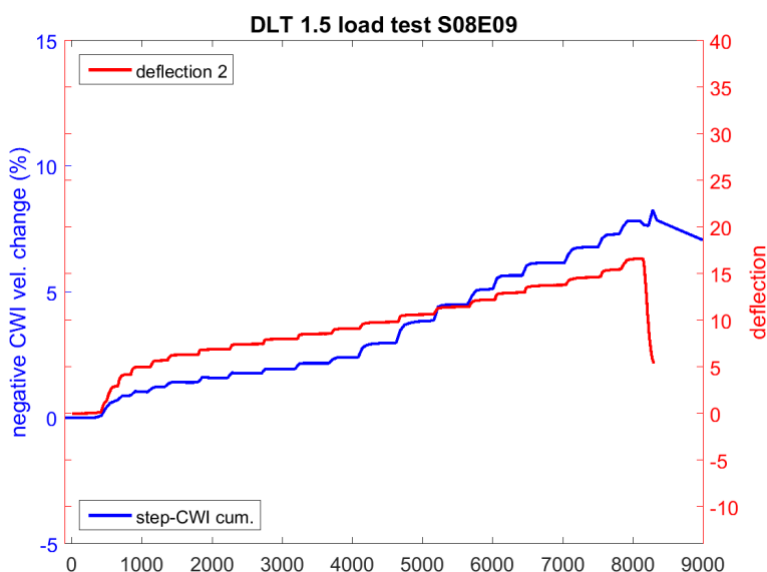


Abbildung 69: DLT 1.5: Vergleich Wellengeschwindigkeitsänderung – Durchbiegung über den Versuchsverlauf. Legende SXXEYY: XX benennt den Sender Transducer, YY den Empfänger-Transducer. Platzierung s. Abbildung 16.

6.6.2 Flächenhafte Darstellung

Die flächenhafte Darstellung der Geschwindigkeitsänderung erfolgt analog zu Träger DLT 1.3 und DLT 1.4 (siehe Abschnitte 6.4.2 und 6.5.2) in Abbildung 70 bis Abbildung 78. Auch der Farbcode ist identisch. Der Träger wurde zur Belastung um seine Längsachse gedreht, um mit einer Vielzahl auf dem Spannboden stehenden Hydraulikpressen eine Linienlast von oben zu simulieren. Für die Darstellung hier wurde der Träger „zurückgedreht“, ist also wie in Abbildung 15 orientiert.

Abbildung 70 zeigt den Referenzzustand. Anders als bei den bisher diskutierten Trägern zeigt sich hier (Abbildung 71 und folgende) im rechten Teil des dargestellten Trägerschnitts (rechts von Transducer 12 und 8) eine weitgehend horizontale Geschwindigkeitsverteilung. Wie zu vermuten war, erkennt man oben (Druckzone) eine Geschwindigkeitszunahme, unten (Zugzone) eine Geschwindigkeitsabnahme. Im Bereich des Mittelaufagers (unter Transducer 6) ist die Geschwindigkeitsverteilung erwartungsgemäß anders. Mit steigender Last immer besser zu erkennen bildet sich in Richtung Mittelauflager eine Zone mit Geschwindigkeitsabnahme. Auch hier treten Risse auf, allerdings hier korrespondierend mit dem Ort der größten Geschwindigkeitsabnahme im oberen Teil des Stegs (Biegezugseite) (Abbildung 73). In der breiteren Zone der Geschwindigkeitsabnahme rechts unten ziehen sich die Risse bei der gleichen Last

schon bis in die Trägermitte und darüber hinaus. Ab 120 kN Pressenlast (Abbildung 74 bis Abbildung 76) zeigt sich rechts neben dem Mittelaufleger eine immer stärker werdende Anomalie zwischen den Transducern 2 und 7. Diese könnte in Zusammenhang mit dem ab 170 kN (Abbildung 76) ansatzweise sichtbaren, vom Ursprung nach rechts oben führenden diagonalen Riss stehen, der schließlich zum Versagen führt (Abbildung 78). Auch bei DLT 1.5 ist insgesamt der Zusammenhang zwischen den Zonen der Geschwindigkeitsabnahme und dem Rissbild evident.

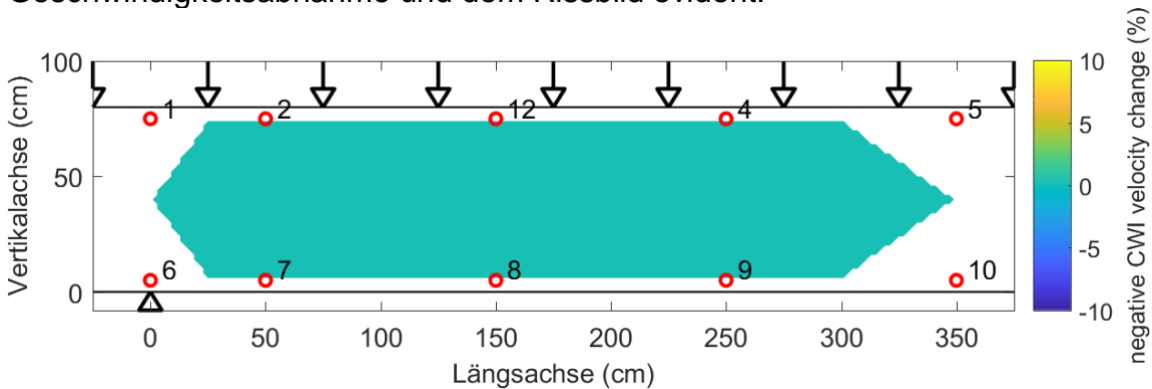


Abbildung 70: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei 0 kN Pressenkraft. Referenzzustand.

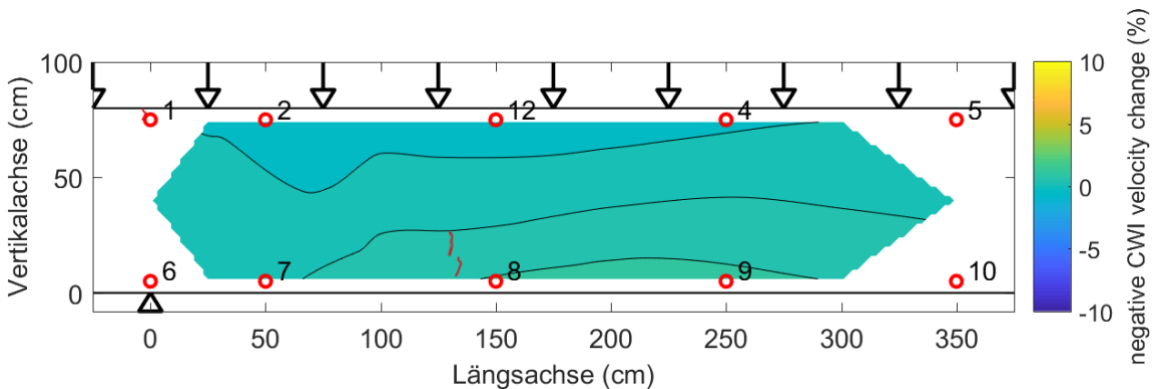


Abbildung 71: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 30 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 2%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

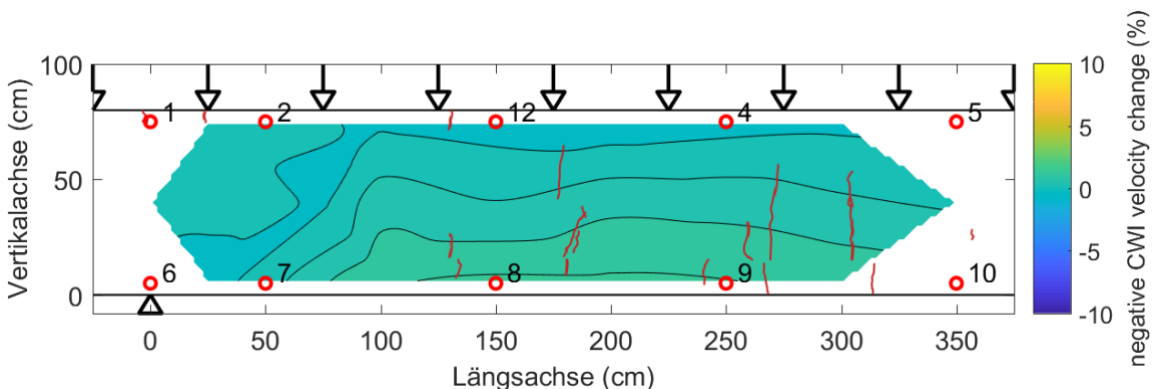


Abbildung 72: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 60 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 3%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

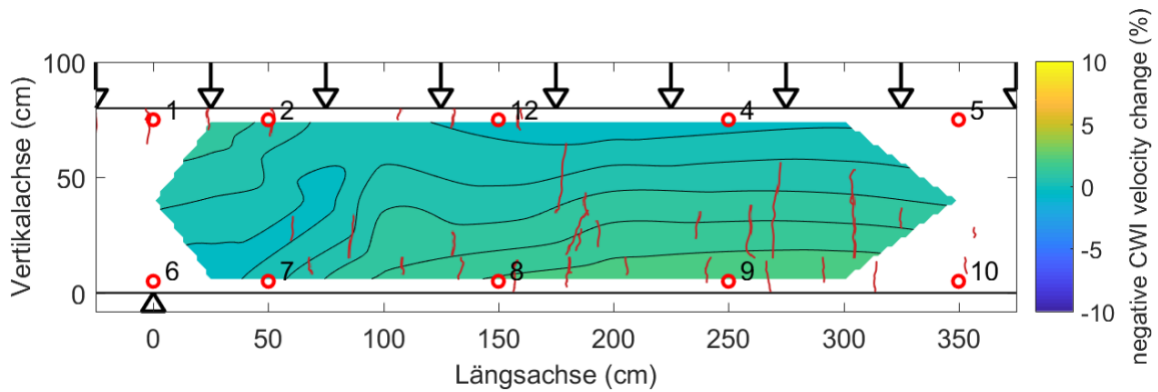


Abbildung 73: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 90 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 5%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

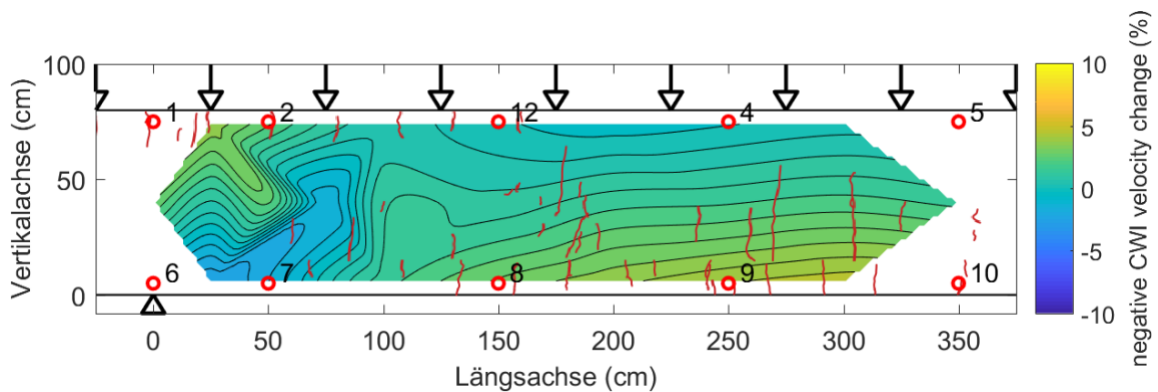


Abbildung 74: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 120 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 8%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

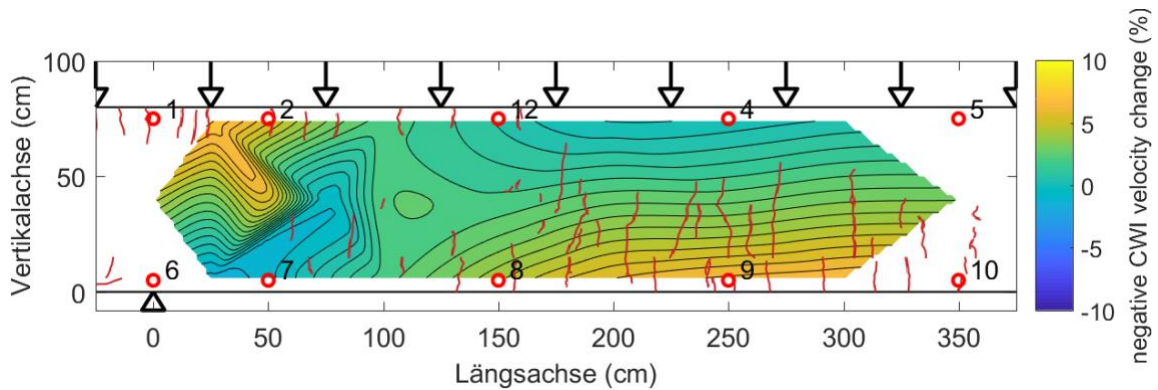


Abbildung 75: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 150 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

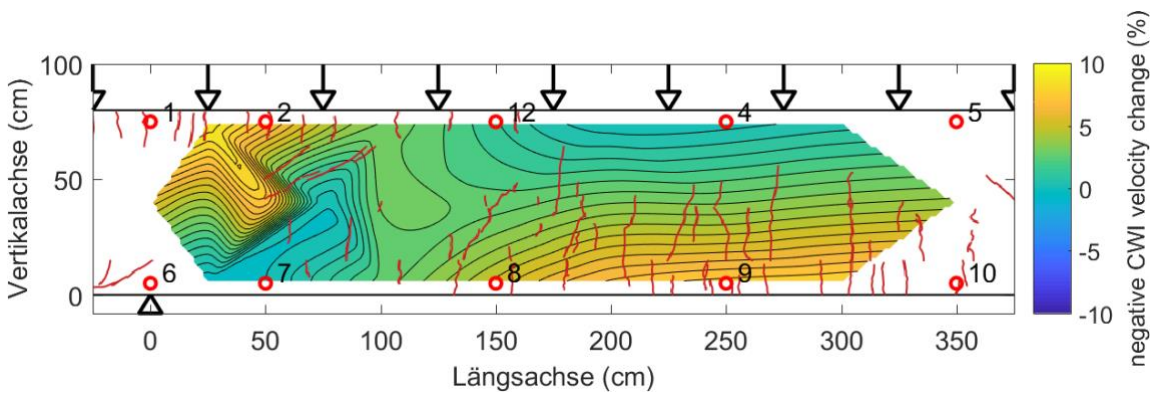


Abbildung 76: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 170 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

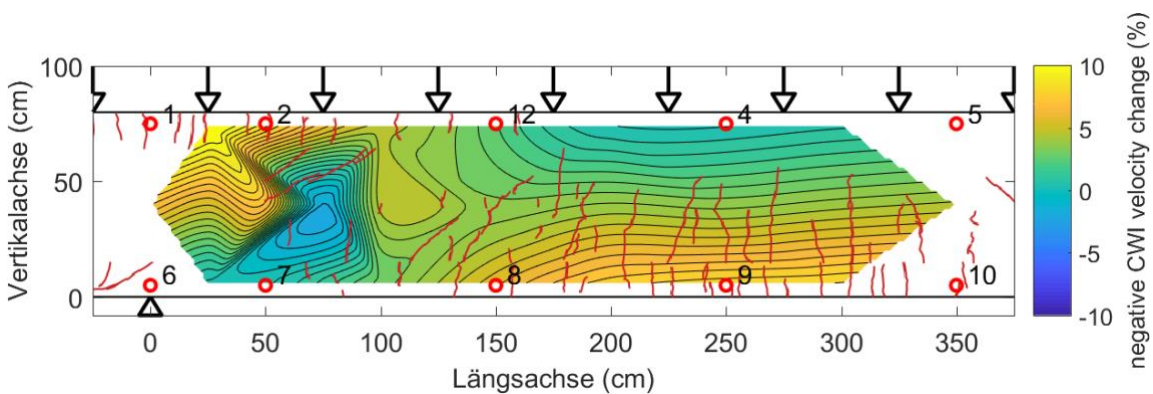


Abbildung 77: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 190 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

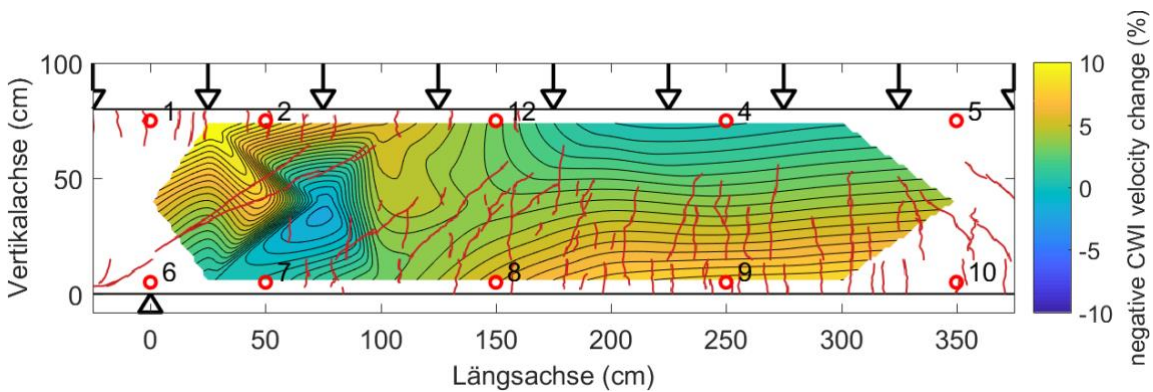


Abbildung 78: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei Bruchlast. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

7 Zusammenfassung und Ausblick

An fünf Spannbetonträgern wurden in der Versuchshalle des IMB, RWTH Aachen, zwischen Anfang 2016 und Frühjahr 2017 Experimente zur Verfolgung von Belastungsversuchen mittels integrierter Ultraschalltransducern durchgeführt.

Schon die ersten Messungen zeigten, dass sich die Belastungen der Träger in Veränderungen der in Transmission gemessenen Ultraschallsignale widerspiegeln. Allerdings waren mehrere der für die Auswertung gewählten Parameter bei geringer Belastung zu unempfindlich. Die sehr sensitive Codawelleninterferometrie war bei geringen Lasten erfolgreich, stieg aber schon früh im Experiment aufgrund zu großer Änderungen gegenüber der Referenzmessung aus. Zudem waren die Messungen an den ersten beiden Trägern nur eingeschränkt erfolgreich, da die Messtechnik und die Anordnung der Transducer in diesen beiden Trägern nicht so wie erwartet funktionierte. Durch Änderungen im Messaufbau (zusätzlicher Messverstärker) und Übergang zu einer regelmäßigen Anordnung der Transducer wurden diese Probleme behoben. Des Weiteren wurde für die Auswertung der Daten eine Variante der Codawelleninterferometrie implementiert, die eine schrittweise Referenz nutzt.

In den dritten Träger wurde eine deutlich größere Zahl von Transducern eingebaut und die verbesserte Messkonfiguration samt neuer Auswertemethodik genutzt. Hiermit ließen sich nun über fast den gesamten Versuchsverlauf klare Zusammenhänge zwischen den ermittelten Änderungen der Ultraschallgeschwindigkeit und anderen Versuchsparametern darstellen. Die Ultraschallmethodik erwies sich als sehr sensitiv und zeigte kurz vor Versagen des Trägers signifikante Änderungen, die sich potentiell in Vorwarnsystemen nutzen lassen. Flächenhafte Darstellungen der Geschwindigkeitsänderung zeigten qualitativ eine deutliche Korrelation mit dem auftretenden Rissbild und Simulationsergebnissen.

Die am dritten Träger erzielten Ergebnisse wurden an den Träger 4 und 5 bestätigt. An beiden wurde die Transducerzahl gegenüber dem dritten Träger halbiert. Trotzdem zeigten sich auch hier deutliche Korrelationen der Geschwindigkeitsänderungen z. B. zur Durchbiegung und zum Rissbild. Damit ist das Projektziel vollständig erreicht.

Basierend auf den Ergebnissen und Erfahrungen aus dem Projekt wird derzeit die Messtechnik vereinfacht und gleichzeitig robuster ausgelegt. Dies ist für die praktische Anwendung an realen Objekten notwendig. Die Ermittlung optimaler Transduceranordnungen und verbesserter Abbildungsmethoden ist Gegenstand einer in einem EU-Projekt laufenden Promotionsarbeit an der BAM.

Weitere Forschung ist für die quantitative Interpretation der Ergebnisse notwendig. Hierzu müssen die Zusammenhänge zwischen Materialverhalten und Bruchmechanik einerseits sowie den gemessenen Ultraschallsignalen andererseits im Detail aufgeklärt werden. Die in diesem Projekt aufgenommenen Daten werden dabei helfen.

8 Danksagung

Die Kooperation mit den Partnern am Institut für Massivbau der RWTH lief reibungslos, freundlich und unproblematisch. Hierfür sei Dr. Martin Herbrand und den zahlreichen Techniker(inne)n und Student(inn)en in der Versuchshalle ausdrücklich gedankt. Ebenso kollegial war die Unterstützung im Fertigteilwerk der Nessler Grünzig Bau GmbH in Aachen bei der Sensormontage (Herr Kim und Kollegen).

9 Literatur

- [1] DIN EN 12504-4:2004: Prüfung von Beton in Bauwerken--Teil 4: Bestimmung Der Ultraschallgeschwindigkeit.
- [2] Niederleithinger, Ernst, Rolf Krompholz, Sabine Müller, Rainer Lautenschläger, and Jan Kittler. "36 Jahre Talsperre Eibenstock – 36 Jahre Überwachung Des Betonzustands Durch Ultraschall." In *38. Dresdner Wasserbaukolloquium 2015 „Messen Und Überwachen Im Wasserbau Und Am Gewässer“*. Dresden, 2015.
- [3] Song, Gangbing, Haichang Gu, and Yi-Lung Mo. "Smart Aggregates: Multi-Functional Sensors for Concrete Structures—a Tutorial and a Review." *Smart Materials and Structures* 17, no. 3 (June 1, 2008): 033001. doi:10.1088/0964-1726/17/3/033001.
- [4] Niederleithinger, Ernst, Julia Wolf, Frank Mielentz, Herbert Wiggerhauser, and Stephan Pirskawetz. "Embedded Ultrasonic Transducers for Active and Passive Concrete Monitoring." *Sensors* 15, no. 5 (May 2015): 9756–72. doi:10.3390/s150509756.
- [5] Wolf, Julia, Ernst Niederleithinger, Frank Mielentz, Sven Grothe, and Herbert Wiggerhauser. "Überwachung von Betonkonstruktionen Mit Eingebetteten Ultraschallsensoren." *Bautechnik* 91, no. 11 (November 2014): 783–96. doi:10.1002/bate.201400073.
- [6] Snieder, Roel. "Coda Wave Interferometry and the Equilibration of Energy in Elastic Media." *Physical Review E* 66, no. 4 (October 2002). doi:10.1103/PhysRevE.66.046615.
- [7] Snieder, Roel. "The Theory of Coda Wave Interferometry." *Pure and Applied Geophysics* 163, no. 2–3 (February 2006): 455–73. doi:10.1007/s00024-005-0026-6.
- [8] Grêt, Alexandre, Roel Snieder, and John Scales. "Time-Lapse Monitoring of Rock Properties with Coda Wave Interferometry." *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 111, no. B3 (March 2006): n/a-n/a. doi:10.1029/2004JB003354.
- [9] Planès, T., and E. Larose. "A Review of Ultrasonic Coda Wave Interferometry in Concrete." *Cement and Concrete Research* 53 (November 2013): 248–55. doi:10.1016/j.cemconres.2013.07.009.
- [10] Sens-Schönfelder, C., and U. Wegler. "Passive Image Interferometry and Seasonal Variations of Seismic Velocities at Merapi Volcano, Indonesia." *Geophysical Research Letters* 33, no. 21 (November 1, 2006). doi:10.1029/2006GL027797.
- [11] Shokouhi, P., E. Niederleithinger, A. Zoëga, A. Barner, and D. Schöne. "Using Ultrasonic Coda Wave Interferometry for Monitoring Stress-Induced Changes in Concrete." In *23rd SAGEEP Symposium on the Application of Geophysics to*

- Engineering and Environmental Problems (Proceedings)*, 650–54. Keystone, Colorado, USA: Environmental and Engineering Geophysical Society, 2010.
- [12] Pacheco, Carlos, and Roel Snieder. “Time-Lapse Travel Time Change of Multiply Scattered Acoustic Waves.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 118, no. 3 (2005): 1300. doi:10.1121/1.2000827.
- [13] Planes, Thomas, Vincent Rosseto, Eric Larose, and Ludovic Margerin. “Locating a Small Change in a Multiple Scattering Environment (LOCADIF): Application to Monitoring Concrete.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 128, no. 4 (2010): 2375. doi:10.1121/1.3508438.
- [14] Niederleithinger, Ernst, Christoph Sens-Schönfelder, Sven Grothe, and Herbert Wiggerhauser. “Coda Wave Interferometry Used to Localize Compressional Load Effects on a Concrete Specimen.” In *Proceedings of 7th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM)*. Nantes, France, 2014.
- [15] Zhang, Yuxiang, Thomas Planès, Eric Larose, Anne Obermann, Claude Rospars, and Gautier Moreau. “Diffuse Ultrasound Monitoring of Stress and Damage Development on a 15-Ton Concrete Beam.” *The Journal of the Acoustical Society of America* 139, no. 4 (April 2016): 1691–1701. doi:10.1121/1.4945097.

Bilder

Abbildung 1: Der Ultraschall-Transducer ACS S0807

Abbildung 2: Frequenzspektrum des ACS S0807 [4]

Abbildung 3: Prinzipskizze: Wellenwege (Pfeile) und Einflussbereiche (rötlich schattiert) von direkten und diffusen Signalen

Abbildung 4: Einfluss einer kleinen Last auf ein Ultraschall-Transmissionssignal

Abbildung 5: Bestimmung der Geschwindigkeit mit Codawelleninterferometrie. Das zu vergleichende Signal wird gedehnt bzw. gestreckt, bis eine optimale Korrelation (Ähnlichkeit) erreicht ist. Dabei können unterschiedliche Teile des Signals („windows“) genutzt werden.

Abbildung 6: Zeitverlauf der mit CWI ermittelten Geschwindigkeitsänderung während des Versuchs

Abbildung 7: Zeitlicher Verlauf der CWI-Korrelationskoeffizienten zur Auswertung aus Abbildung 6

Abbildung 8: Links: Montage der Transducer mittels maßgefertigter Clips im Bewehrungskorb (hier: DLT 1.1, Transducer 2). Rechts: Träger DLT 1.4, Transducer 1, 2, 5, und 6.

Abbildung 9: Lage der Transducer in Träger DLT 1.1 (in Träger DLT1.2 identisch), Längsschnitt. Trägerlänge 12 m. Rot: Ultraschalltransducer.

Abbildung 10: Wie Abbildung 9, vergrößert. Trägerhöhe 0,8 m, Abstand zwischen vertikalen Bügeln 0,25 m. Rote Pfeile: Verwendete Transducerpaare (s. Kapitel 4).

Abbildung 11: Lage der Transducer (Projektion) im Querschnitt von DLT 1.1 (in DLT 1.2 identisch).

Abbildung 12: Lage der Transducer in DLT 1.3, Längsschnitt. Trägerlänge 12 m. Rot: Ultraschalltransducer.

Abbildung 13: Wie Abbildung 12, vergrößert. Trägerhöhe 0,8 m, Abstand zwischen vertikalen Bügeln 0,25 m. Rote Pfeile: Verwendete Transducerpaare (s. Kapitel 4).

Abbildung 14: Lage der Transducer (Projektion) im Querschnitt von DLT 1.3. Die Montage erfolgte abweichend von den anderen Trägern in der Regel senkrecht. Ausnahmen sind Transducer 8 und 9, die aufgrund der Lage der Spannkäule horizontal montiert wurden.

Abbildung 15: Lage der Transducer in Träger DLT 1.4 (in Träger DLT 1.5 identisch), Längsschnitt. Trägerlänge 12 m. Rot: Ultraschalltransducer.

Abbildung 16: Wie Abbildung 15, vergrößert. Trägerhöhe 0,8 m, Abstand zwischen vertikalen Bügeln 0,25 m. Rote Pfeile: Verwendete Transducerpaare (s. Kapitel 4).

Abbildung 17: Lage der Transducer (Projektion) im Querschnitt von DLT 1.4 (in DLT 1.5 identisch).

Abbildung 18: Skizze des Aufbaus der Ultraschall-Messtechnik. Der Empfänger-Verstärker SR560 wurde erst ab Träger DLT 1.3 eingesetzt. Die Nummern entsprechen den Geräten in Abbildung 19.

Abbildung 19: Aufbau der Ultraschall-Messtechnik in der Versuchshalle der RWTH. 1: Messrechner, 2: Datenerfassung, 3: Signalgenerator, 4: Multiplexer, 5: Kabelführung zu den Transducern im Beton.

Abbildung 20: Beispiel für eine Einzelmessung vor und nach der Datenbearbeitung

Abbildung 21: Beispiel für bearbeitete Messsignale vor der Belastung (jeweils blau), bei geringer Belastung (oben, rot) und mittlerer Belastung (unten, rot).bbildung 20: Beispiel für eine Einzelmessung vor und nach der Datenbearbeitung.

Abbildung 22: Verlauf der Kreuzkorrelation für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers. Legende SXXEYY: XX benennt den Sender Transducer, YY den Empfänger-Transducer. Platzierung s. Abbildung 10.

Abbildung 23: Verlauf der Kompressionswellengeschwindigkeit für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers

Abbildung 24: Verlauf des Energiegehalts der Signale (normiert auf den Wert zu Versuchsbeginn) für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

Abbildung 25: Verlauf der mit CWI (feste Referenz) ermittelten Änderung der Wellengeschwindigkeit (Vorzeichen verkehrt) für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

Abbildung 26: Verlauf des mit CWI (feste Referenz) ermittelten Korrelationskoeffizienten für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

Abbildung 27: Verlauf der mit CWI (schrittweise Referenz) ermittelten Änderung der Wellengeschwindigkeit (Vorzeichen verkehrt) für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

Abbildung 28: Wie Abbildung 27, Detail erste Versuchsphase (geringe Pressenkraft).

Abbildung 29: Verlauf der mit CWI (schrittweise Referenz) ermittelten Korrelationskoeffizienten für vier Transducerpaare während des Belastungsversuchs an DLT 1.2 im Vergleich zur Pressenkraft für den instrumentierten Teil des Trägers.

Abbildung 72: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 60 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 3%. Rote Linien: Rissbild RWTH

Abbildung 73: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 90 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 5%. Rote Linien: Rissbild RWTH

Abbildung 74: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 120 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis 8%. Rote Linien: Rissbild RWTH

Abbildung 75: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 150 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH.

Abbildung 76: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 170 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH

Abbildung 77: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei ca. 190 kN Pressenkraft. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH

Abbildung 78: DLT 1.5, Geschwindigkeitsänderung bei Bruchlast. Geschwindigkeitsänderungen bis über 10%. Rote Linien: Rissbild RWTH

Tabellen

Tab. 1: Daten zur Sensormontage

Tab. 2: Messparameter für die Versuche an DLT 1.3

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2017

B 135: Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 136: HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden

Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 137: Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton

Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken

Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 139: Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie

Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden, Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5

U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 141: Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln

Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 142: Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken

Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer, Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2018

B 143: Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln

Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke

Neumann, Brauer € 16,50

B 145: 8. BAST-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

B 147: Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen

Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2020

B 146: Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Paschen, Dürer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 148: Übergreifungslängen von Betonstahlbewehrung Maßgebende Einflussparameter in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit

Maurer, Bettin
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 149: Untersuchungen zum Einfluss von Modellparametern auf die Lebensdauerprognose für Brückenbauwerke

Keßler, Gehlen € 16,00

B 150: Beurteilung der Querkraft- und Torsionstragfähigkeit von Brücken im Bestand – erweiterte Bemessungsansätze

Hegger, Herbrand, Adam, Maurer, Gleich, Stuppak, Fischer, Schramm, Scheufler, Zilch, Tecusan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 151: Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Zuverlässigkeit von dauerüberwachten Bestandsbrücken

Ralbovsky, Prammer, Lachinger, Vorwagner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 152: Bemessung von Kopfbolzendübeln in Randlage unter Vermeidung eines Versagens infolge Herausziehens

Kuhlmann, Stempniewski
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 153: Kanalbrücke Berkenthin mit temperierter Fahrbahn – Pilotprojekt

Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski € 15,00

B 154: Korrosionsschutz von Brückenseilen – Wickelverfahren mit Korrosionsschutzbändern

Friedrich € 9,00

B 155: Innovativer und nachhaltiger Ersatzneubau von Betonbrücken

Wirker, Donner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 156: Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen von Monitoringmaßnahmen – Entwicklung eines Konzepts für die Analyse von Nutzen und Kosten

Schubert, Faber, Betz, Straub, Niemeier, Ziegler, Walther, Majka
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 157: 9. BAST-Tunnelsymposium – Tagungsband

€ 16,00

B 158: Beanspruchung orthotroper Fahrbahnplatten infolge der Erneuerung des Brückenbelags

Friedrich, Eilers, Quaas, Robrecht, Schamne, Staack
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 159: Lebenszyklusmanagement für Bauwerke der Verkehrsinfrastruktur – Entwicklung eines verkehrsträgerübergreifenden, indikatorgestützten Systems

Lebhardt, Seiler, Gerdas € 15,50

2021

B 160: **Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke – Datenerfassungsstrategien und Datenanalyse für intelligente Kalottenlager**

Butz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 161: **Lagerwege von Brücken**

Butz, Mack, Krawtschuk, Maldonado

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 162: **Druckgurtanschluss in Hohlkastenbrücken – Ingenieurmodelle zur wirklichkeitsnahen Ermittlung der Tragfähigkeit**

Müller

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 163: **Dauerüberwachung von Bestandsbrücken – Quantifizierung von Zuverlässigkeit und Nutzen**

Hindersmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 164: **Intelligente Bauwerke – Verfahren zur Auswertung, Verifizierung und Aufbereitung von Messdaten**

Kleinert, Sawo

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 165: **Reaktions- und Wiederherstellungsprozess für die Straßeninfrastruktur nach disruptiven Ereignissen**

Deublein, Roth, Bruns, Zulauf

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 166: **Verfahren und Modelle zur Quantifizierung der Verfügbarkeit und Sicherheit von Elementen der Straßeninfrastruktur bei außergewöhnlichen Ereignissen**

Finger, Stolz, Fischer, Hasenstein, Rinder

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 167: **Erfahrungssammlung zu Fahrbahnübergängen aus Polyurethan**

Staeck, Eilers

€ 15,50

B 168: **Digitales Testfeld Autobahn – Intelligente Brücke Messtechnische Erfassung von Verkehrsdaten auf der Basis von instrumentierten Fahrbahnübergängen**

Rill

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 169: **Entwicklung von Bemessungshilfen für bestehende Stahlbetonkragarme auf Basis nichtlinearer Berechnungen**

Neumann, Brauer

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 170: **Feuerverzinken als dauerhafter Korrosionsschutz für Stahlverbundbrücken – Praxisbericht zum Pilotprojekt**

Ansorge, Franz, Düren-Rost, Friedrich, Huckshold, Lebelt, Rademacher, Ungermann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 171: **Bauwerksprüfung gemäß DIN 1076 – Unterstützung durch (halb-) automatisierte Bildauswertung durch UAV (Unmanned Aerial Vehicles – Unbemannte Fluggeräte)**

Morgenthal, Rodehorst, Hallermann, Debus, Benz

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 172: **Querkrafttragfähigkeit von Spannbetonbrücken – Erfassung von Spannungszuständen in Spannbetonversuchsträgern mit Ultraschallsensoren**

Niederleithinger, Werner, Galindo, Casares, Bertschat, Mierschke, Wang, Wiggenhauser

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <https://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-48

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.